



# 混凝土损伤塑性模型参数选取及应用

王琮与<sup>1</sup>, 桑登峰<sup>1</sup>, 娄学谦<sup>1</sup>, 邹学韬<sup>2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 针对 ABAQUS(有限元分析软件)的 CDP 模型(混凝土损伤塑性模型)的参数选取问题, 结合袁迎曙的试验结果, 对 CDP 模型的黏性系数、剪胀角以及计算方法的选取展开探讨。结果表明: 1) 黏性系数取 0.001 时具有良好的计算精度和收敛性; 2) 剪胀角取  $36^\circ$  左右时, 计算结果与试验结果最为吻合; 3) 对于 CDP 模型的钢筋混凝土, 不适合采用 Risk 法(弧长法)进行计算, 而应采用“Static, General”法(一般静力学法)。参数建议值的计算结果较好地反应出钢筋混凝土梁损伤开裂破坏的过程, 可为港口码头等工程钢筋混凝土构件力学性能的研究提供参考。

**关键词:** 混凝土损伤塑性模型; 黏性系数; 剪胀角; 计算方法; ABAQUS

中图分类号: TU 31; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0026-06

## Parameter selection and application of concrete damage plasticity model

WANG Qiongyu<sup>1</sup>, SANG Dengfeng<sup>1</sup>, LOU Xueqian<sup>1</sup>, ZOU Xuetao<sup>2</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Regarding the parameter selection of ABAQUS (finite element analysis software) CDP model (concrete damage plastic model), combined with the experimental results of Yuan Yingshu, the selection of viscosity coefficient, dilation angle and calculation method of CDP model is discussed. The results show that: 1) When the viscosity coefficient is 0.001, it has good calculation accuracy and convergence; 2) When the dilation angle is about  $36^\circ$ , the calculated results are in the best agreement with the experimental results; 3) For the reinforced concrete problem of CDP model, the “Static, General” method (general statics method) should be used instead of the Risk method (arc-length method). The calculation results of the suggested values of these parameters can well reflect the damage and cracking process of reinforced concrete beams, and can provide a reference for the research on mechanical properties of reinforced concrete members in port and wharf projects.

**Keywords:** concrete damage plasticity model; viscosity coefficient; dilation angle; calculation method; ABAQUS

钢筋混凝土构件是港口码头等工程结构中的主要受力构件, 在码头长期服役多年后, 由于钢筋锈蚀或在外力荷载的长期作用下, 其承载力有所下降。研究在役钢筋混凝土梁构件承载力性能, 对码头建筑物安全性的评估有着重要的影响。对于混凝土性能的研究, 除试验研究<sup>[1-3]</sup>外, 有限元模拟亦是一种有效的方法。ABAQUS 有限元分析

软件专门为混凝土材料提供了两种本构模型, 分别为混凝土损伤塑性模型(CDP 模型)和弥散开裂模型, 本文只讨论前者。对于岩体、颗粒土体、混凝土等材料, 在受剪切作用时, 由于颗粒错动, 往往产生塑性体积变形, 这种特性称为剪胀<sup>[4]</sup>。剪胀角即为实际塑性应变与剪切应变之间的夹角。

用户定义 CDP 模型时, 不仅要给定材料的应

收稿日期: 2022-08-22

作者简介: 王琮与 (1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事海洋工程、结构强度分析等工作。

力-应变关系, 还需指定剪胀角  $\psi$  和黏性系数  $\nu$ 。然而, 混凝土的  $\psi$  和  $\nu$  如何取值, 目前尚未定论。 $\nu$  越大结构越“硬”, 计算效率越高;  $\nu$  越小计算效率越低, 甚至不收敛。对于混凝土等脆性材料,  $\nu$  应尽量取较小值。雷拓等<sup>[5]</sup>认为  $\psi$  宜取  $30^\circ$ ,  $\nu$  取 0.000 5 时结果较为满意。ABAQUS 帮助文档<sup>[6]</sup>的钢筋混凝土示例中,  $\psi$  和  $\nu$  分别取  $15^\circ$  和  $0^\circ$ 。为更精确地了解钢筋混凝土受力性能, 有必要对其  $\psi$  和  $\nu$  进一步研究。

此外, Risk 法(弧长法)具有计算效率高、易收敛等特点, 常用于求解不稳定的非线性问题, 但是否适用于求解钢筋混凝土大变形问题, 有待验证。

针对 CDP 模型的  $\psi$  和  $\nu$  以及计算方法的选取问题, 本文结合袁迎曙等<sup>[7]</sup>的试验结果进行深入研究, 以期给港口码头等工程钢筋混凝土构件力学性能的研究提供参考。

## 1 CDP 模型本构关系

由能量等效原理<sup>[8]</sup>可得, 受损材料的应力-应变关系:

$$\sigma = E_0(1-d)^2 \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  和  $\varepsilon$  分别为总应力和总应变;  $E_0$  为初始(无损)弹性模量;  $d$  为 CDP 模型的损伤因子。

根据公式(1)与 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[9]</sup>, CDP 模型的损伤因子按以下公式计算。

单轴受拉的损伤因子  $d_t$  为:

$$d_t = 1 - \sqrt{\frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}} \quad (x > 1) \quad (2)$$

其中:  $\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_0 \varepsilon_{t,r}}$ ,  $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}$ 。

式中:  $f_{t,r}$  为混凝土单轴抗拉强度代表值;  $\varepsilon_{t,r}$  为与  $f_{t,r}$  相应的混凝土峰值拉应变;  $\alpha_t$  为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值, 按《混凝土结构设计规范》的表 C. 2. 3 取值。

单轴受压的损伤因子  $d_c$  为:

$$\begin{cases} d_c = 1 - \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_c + x^{\frac{1}{1-\rho_c}}(1-\rho_c)}} & (x \leq 1) \\ d_c = 1 - \sqrt{\frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2 + x}} & (x > 1) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_0 \varepsilon_{c,r}}$ ,  $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}$ 。

式中:  $f_{c,r}$  为混凝土单轴抗压强度代表值;  $\varepsilon_{c,r}$  为与单轴抗压强度  $f_{c,r}$  相应的混凝土峰值压应变;  $\alpha_c$  为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值, 按《混凝土结构设计规范》的表 C. 2. 4 取值。

ABAQUS 中, 混凝土损伤后, 拉伸和压缩的后继破坏性态分别由应力-开裂应变关系和应力-非弹性应变关系来表征。开裂应变  $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$  和非弹性应变  $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$  的表达式分别为:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_t$  和  $\varepsilon_t$  分别为总拉伸应力和总拉伸应变;  $\sigma_c$  和  $\varepsilon_c$  分别为总压缩应力和总压缩应变。由式(2)~(5)可得 CDP 模型的本构关系, 即拉伸时的损伤因子-开裂应变关系和应力-开裂应变关系; 压缩时的损伤因子-非弹性应变关系和应力-非弹性应变关系。

## 2 CDP 模型参数的选取

### 2.1 有限元模型

#### 2.1.1 几何模型

为与试验结果比较, 建模采用袁迎曙的钢筋混凝土试验梁, 其尺寸和配筋分布见图 1。跨中两边施加载荷, 相距 0.5 m。简支边界条件, 有效跨度为 1.7 m。钢筋保护层厚度为 25 mm。

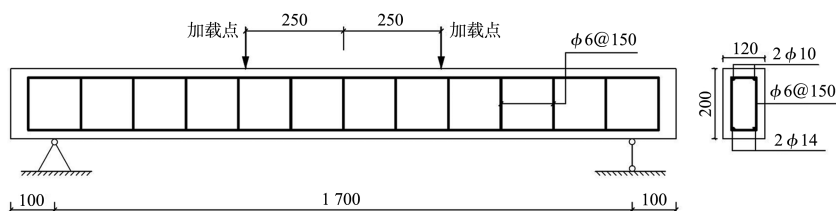


图 1 试验梁尺寸和配筋分布 (单位: mm)

采用分离式建模,即分别建立混凝土 3D 模型和钢筋线模型,然后在 Property (特性)模块的 Section (截面)中赋予钢筋横截面积,装配后在 Interaction (相互作用)模块采用 Embedded (嵌入式)技术建立钢筋和混凝土的黏结关系。

## 2.1.2 材料模型

### 2.1.2.1 钢筋

钢筋的屈服强度  $f_y = 300$  MPa, 弹性模量  $E_s = 200$  GPa, 泊松比  $\nu_s = 0.3$ , 采用弹性理想塑性模型, 见图 2。

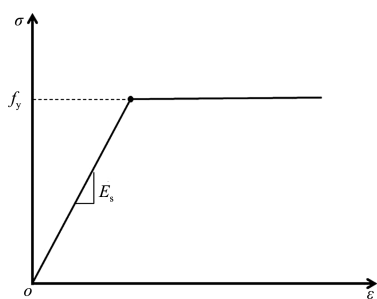


图 2 钢筋材料模型

### 2.1.2.2 混凝土

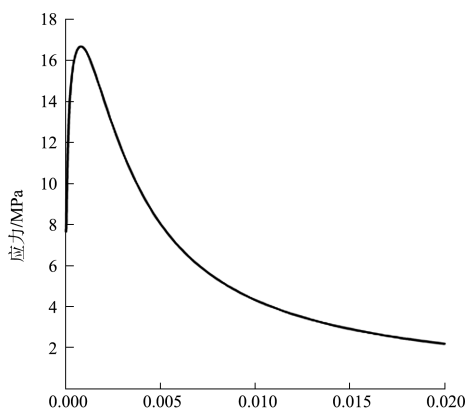
本文采用 C25 混凝土, 根据《混凝土结构设计规范》可得表 1。

表 1 C25 混凝土单轴受载时的参数

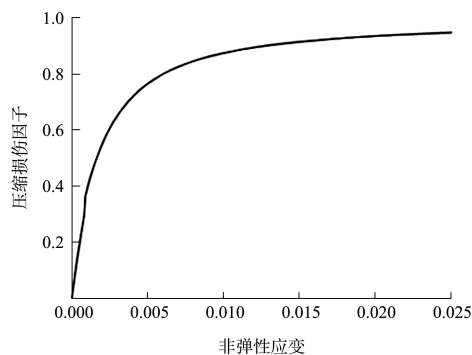
$E_0/\text{MPa}$	$\nu_c$	$f_{c,r}/\text{MPa}$	$f_{t,r}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{c,r}/10^{-6}$	$\varepsilon_{t,r}/10^{-6}$	$\alpha_c$	$\alpha_t$
28 000	0.2	16.7	1.78	1 403	64	0.53	0.99

注:  $f_{c,r}$  和  $f_{t,r}$  分别取混凝土轴心抗压和抗拉强度标准值;  $\nu_c$  为混凝土泊松比。

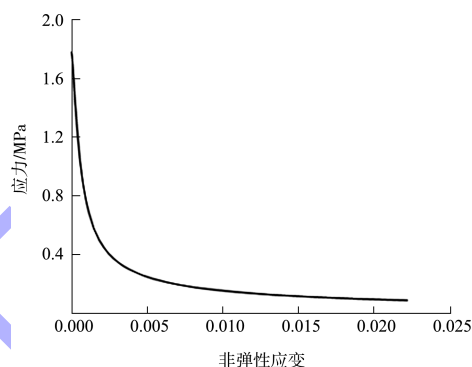
将表 1 的数据代入式(1)~(5), 得 C25 混凝土的 CDP 模型的本构关系, 见图 3。需注意 ABAQUS 的应力(应变)为真实应力(应变), 因此在计算时须将名义应力(应变)转化成真实应力(应变)。



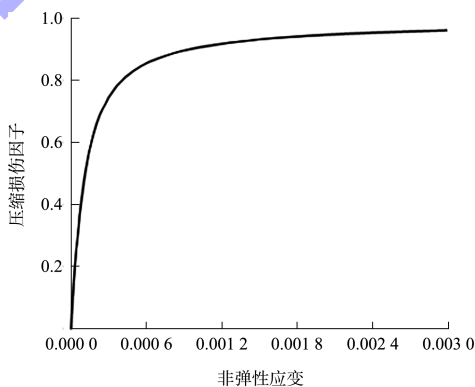
a) 混凝土受压时的应力-非弹性应变曲线



b) 混凝土受压时的损伤因子-非弹性应变曲线



c) 混凝土受拉时的应力-开裂应变曲线

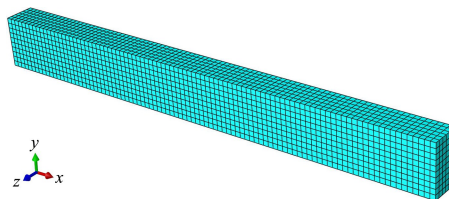


d) 混凝土受拉时的损伤因子-开裂应变曲线

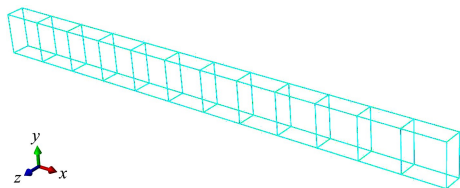
图 3 混凝土的 CDP 模型的本构关系

### 2.1.3 网格划分

混凝土和钢筋分别采用 C3D8R 单元和 T3D2 杆单元, 单元尺寸为 20 mm。整个模型的单元数目为 5 948 个, 见图 4。



a) 混凝土



b) 钢筋

图4 钢筋混凝土网格划分

### 2.1.4 载荷与边界条件

采用位移载荷, 用支座反力反应施加载荷值。载荷施加在中间2块刚体垫块上, 即刚体参考点的 $Y$ 方向的位移 $U_2 = -0.007$  m, 绕 $X$ 轴旋转自由度 $U_{R1} = 0$ 。采用简支边界条件。考虑结构自身重力, 见图5。

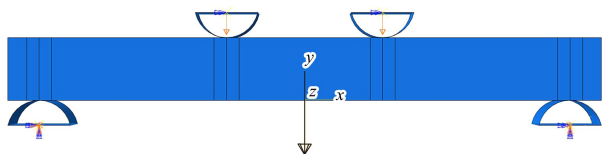


图5 载荷与边界条件

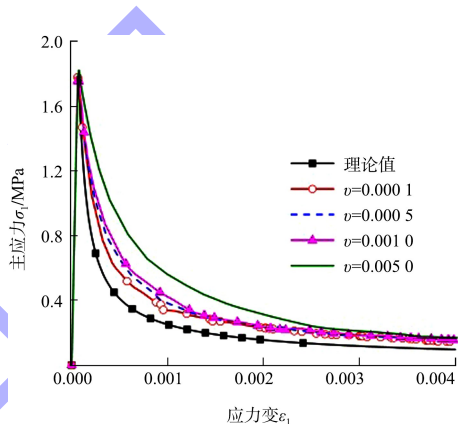
## 2.2 参数选取

ABAQUS 定义 CDP 模型时, 需指定下面的塑性参数: 流动势偏移参数 $\varepsilon$ 、双轴极限抗压应力与单轴极限抗压应力之比 $f_{b0}/f_{c0}$ 、拉伸子午面上和压缩子午面上的第二应力不变量之比 $K$ 以及 $\psi$ 、 $\nu$ 。无试验数据时,  $\varepsilon$ 、 $f_{b0}/f_{c0}$ 和 $K$ 可分别采用默认值0.1、1.16和2/3。但对于 $\psi$ 和 $\nu$ , 不同材料差异较大。

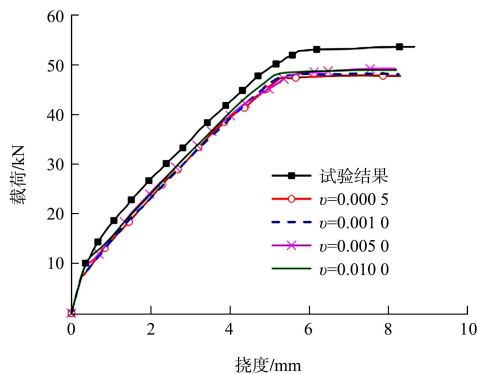
### 2.2.1 黏性系数

ABAQUS 中,  $\nu$  的默认值为0<sup>[10]</sup>, 也是 ABAQUS 帮助文档例子所采用的参数值, 但在多数模型计算中,  $\nu=0$  往往导致计算不收敛。为寻求最佳 $\nu$ , 通过计算不同 $\nu$ 的结果( $\psi=36^\circ$ ), 并将数值结果、公式(1)的理论值以及试验结果进行比较, 见图6。图6a)表明,  $\nu$  对混凝土的应力-应变曲线影响较大,  $\nu$  越小脆性断裂越明显, 模拟得到的主应力-主应变曲线越接近理论值, 因此应尽量取较小值。从图6可知,  $\nu=0.0010$  时的主应力-主应变曲线和 $\nu=0.0001$ 或 $\nu=0.0005$ (雷拓采用的参数值)

的误差较小, 而 $\nu=0.0050$ 时计算得到的主应力-主应变曲线与理论值误差较大。图6b)表明,  $\nu$  越大混凝土开裂越晚, 抗弯能力越强, 但总体上 $\nu$ 取0.0005、0.0010、0.0050和0.0100时计算得到的跨中载荷-挠度曲线的误差较小。此外,  $\nu$  对计算收敛速度影响较大, 尤其对于较大或较为复杂的模型,  $\nu$  过小将导致计算效率很低, 甚至不收敛。对于本次计算,  $\nu=0.0005$  所需的计算时间约为 $\nu=0.0010$ 的1.3倍。因此, 为保证计算精度和加快收敛速度, 建议取 $\nu=0.0010$ 。



a) 受拉区主应力-主应变曲线



b) 受跨中载荷-挠度曲线

图6 黏性系数对结果的影响

对于该模型, 当 $\nu=0$ 时, 计算不收敛。为验证当 $\nu=0$ 时模拟结果与理论值的吻合度, 取1个单元进行分析(图7), 单元类型为C3D8R。边界条件为1234面、2376面、3487面的法向位移为0。5678面受到与该面垂直的拉伸位移1mm作用。计算结果见图8, 可知, 计算和理论结果非常吻合, 也表明了本文采用本构关系的合理性。

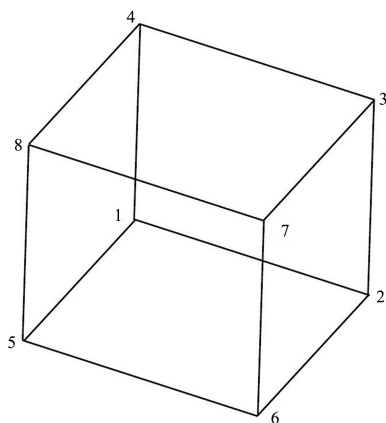
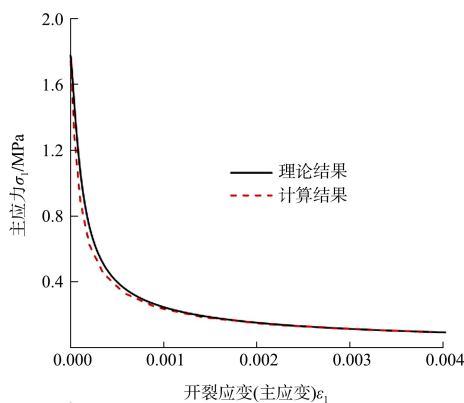


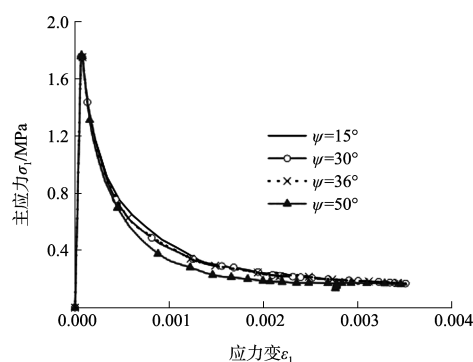
图7 单个单元网格

图8  $\nu=0$  时计算结果与理论结果

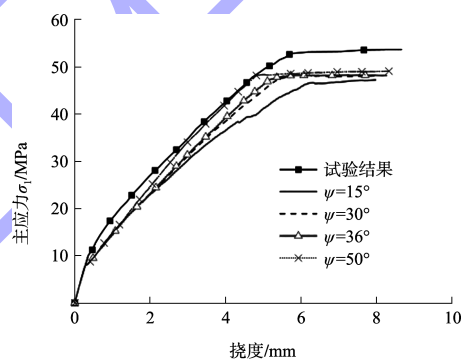
### 2.2.2 剪胀角

CDP 模型中, 剪胀角的取值范围为  $0 < \psi < 56.31^\circ$ , 但具体取值目前尚无定论。为探寻混凝土材料的剪胀角, 计算多个不同剪胀角的结果 ( $\nu=0.001\ 0$ ), 见图 9。结果表明: 1)  $\psi$  不改变混凝土的拉伸峰值应力大小, 且在混凝土开裂前期,  $\psi$  对应力-应变曲线和跨中载荷-挠度曲线影响均较小; 2) 在混凝土开裂后期,  $\psi$  对跨中载荷-挠度曲线的影响较大, 随着  $\psi$  的增加, 跨中载荷-挠度曲线在混凝土开裂至该结构破坏(失稳)阶段的斜率越大, 即钢筋混凝土梁呈现抗载能力逐渐提高的趋势, 因此在计算时应慎重选取; 3)  $\psi$  取  $15^\circ$  (ABAQUS 帮助文档例子取值)、 $30^\circ$  (雷拓取值) 和  $36^\circ$  时主应力-主应变曲线的计算结果互相比为接近, 而  $\psi$  取  $50^\circ$  与它们的计算结果相差较大; 4)  $\psi$  取  $15^\circ$  和  $50^\circ$  时跨中载荷-挠度曲线在混凝土开裂至该结构破坏阶段的斜率与试验结果误差较大, 而  $\psi$  取  $30^\circ$  和  $36^\circ$  时曲线斜率与试验结果

较为吻合, 尤其是  $36^\circ$  时更加符合该结构受载的力学行为(即混凝土开裂后, 结构主要由钢筋承受载荷, 钢筋处于弹性变形阶段, 因此计算结果的曲线斜率与试验结果吻合。因此, 综合考虑  $\psi$  建议取  $36^\circ$ 。



a) 受拉区主应力-主应变曲线



b) 受跨中载荷-挠度曲线

图9 剪胀角对结果的影响

### 2.3 计算方法

ABAQUS 求解静态问题时通常采用“Static, General”(一般静力学法)和“Static, Risk”两种方法。为确定哪种方法更适合求解钢筋混凝土静态问题, 分别以此两种方法进行计算 ( $\psi=36^\circ, \nu=0.001\ 0$ ), 并与试验结果比较, 见图 10。Risk 法的计算结果表明, 受拉纵筋屈服后该梁仍具有明显的抗弯能力, 与试验结果不符; “Static, General”法的计算结果符合试验现象, 即混凝土开裂后, 载荷主要由受拉纵筋承担, 待受拉纵筋屈服后, 梁失去抗弯能力, 从而破坏。因此, 对于钢筋混凝土问题, 当使用 CDP 模型时, 则不采用 Risk 法进行求解, 而应采用“Static, General”法。此外, 鉴于此类问题为大变形问题, 因此应打开非线性选项。



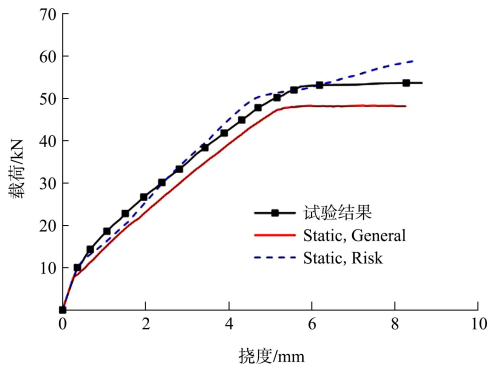


图 10 不同求解方法计算的跨中荷载-挠度曲线

## 2.4 计算结果

当 $\psi=36^\circ$ 和 $\nu=0.001$  0 时, 有较好的计算精度和收敛性, 此时的计算和试验结果与袁迎曙的数值结果的比较见图 11, 应力分布云图见图 12。结果表明: 1) 计算结果的跨中荷载-挠度曲线在混凝土开裂至该结构破坏阶段的斜率比袁迎曙的数值结果更吻合试验结果; 2) 当荷载在 30.0 kN 以内时, 袁迎曙的数值结果比本计算更吻合试验结果, 而当荷载超过 30.0 kN 后, 本计算结果比袁迎曙的数值更吻合试验结果; 3) 本计算结果的极限荷载约为 48.3 kN, 与袁迎曙的数值结果相差不大, 与试验结果(53.7 kN)相差 10%。此外, 梁在荷载作用下的裂纹扩展可通过损伤因子的演化体现(图 13、14), 即梁跨中底部先出现裂纹, 随后逐渐向两端演化。综上, 本次的模拟结果较满意。

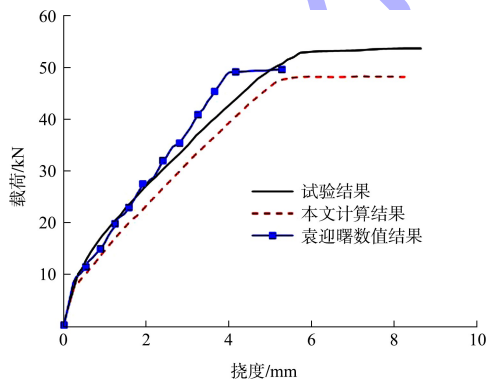
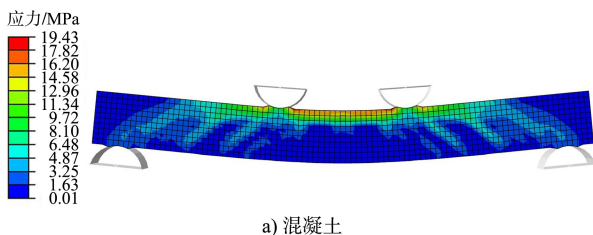
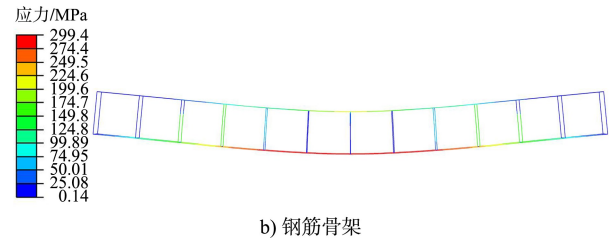


图 11 跨中荷载-挠度曲线

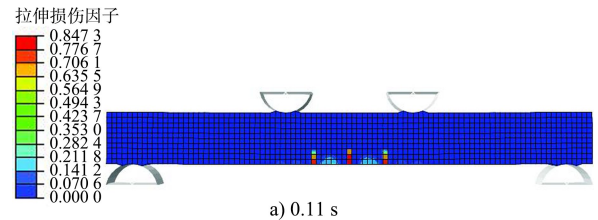


a) 混凝土

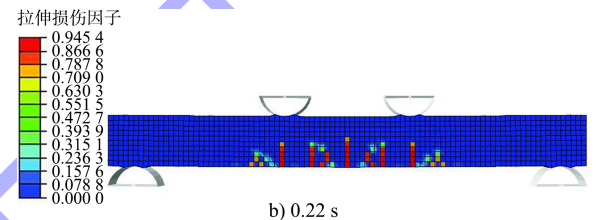


b) 钢筋骨架

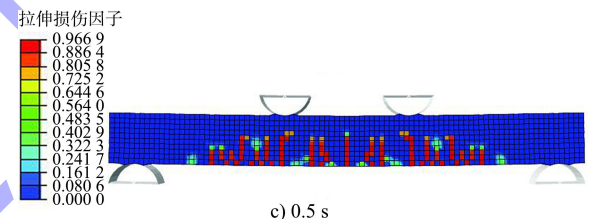
图 12 变形放大 8 倍的应力分布云图



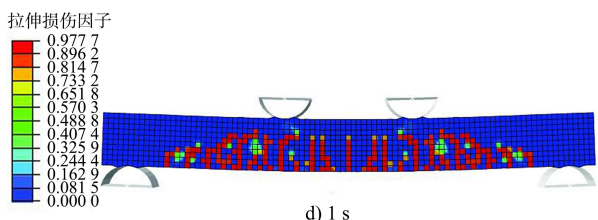
a) 0.11 s



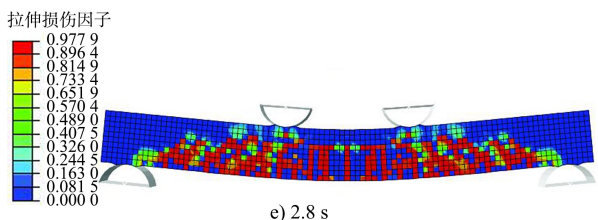
b) 0.22 s



c) 0.5 s



d) 1 s



e) 2.8 s

图 13 总时间为 2.8 s, 变形放大 8 倍的拉伸损伤因子随时间变化云图

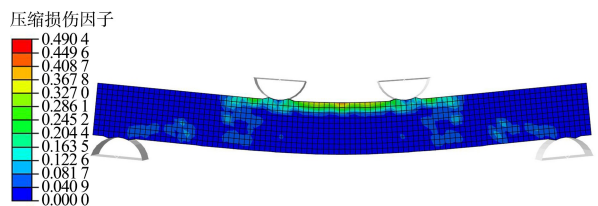


图 14 变形放大 8 倍的压缩损伤因子分布云图

(下转第 50 页)