

基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法研究

王红军^{1,2},任晓丹^{1†},肖少文²,汤明生²

(1. 同济大学土木工程学院,上海 200092;

2. 中信建筑设计研究总院有限公司,湖北 武汉 430014)

摘要:为方便工程应用,定量描述混凝土构件的损伤等级,参考我国现行规范《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)附录C提及的混凝土本构关系,本文提出了一种基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法,根据损伤演化参数的数值,定义构件的损伤等级.规定当损伤演化参数 $d_{c(t)}$ 小于混凝土峰值应变 $\varepsilon_{c(t),r}$ 对应的损伤演化参数 $d_{c(t),r}$ 时,混凝土构件处于无损伤状态(L1级);当损伤演化参数 $d_{c(t)}$ 大于混凝土应变 $\varepsilon_{c(t),u}$ 对应的损伤演化参数 $d_{c(t),u}$ 时,混凝土构件处于严重损伤状态(L6级);当损伤演化参数 $d_{c(t)}$ 处于二者之间时,通过线性插值的方法定义混凝土构件的损伤等级(L2~L5级).为验证该方法的合理性,采用ABAQUS软件建立18根梁和2根柱的精细化模型,并对其进行数值模拟,模拟结果与试验结果拟合良好.依据本文提出的损伤评估方法判定,峰值荷载下的绝大部分梁构件和屈服荷载下的柱构件处于严重损伤状态(L6级).而采用团体标准《建筑结构抗震性能化设计标准》(T/CECA 20024—2022)提及的基于混凝土受压应变的损伤评估方法判定,绝大部分构件处于中度损伤状态(L4级),少部分构件处于比较严重损伤状态(L5级).从宏观层面审视,本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法评估混凝土构件的损伤更符合实际预期,具有一定参考价值.

关键词:混凝土构件;损伤等级;本构关系;损伤评估方法;损伤演化参数;数值分析

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Research on damage assessment method of concrete components based on the material damage

WANG Hongjun^{1,2}, REN Xiaodan^{1†}, XIAO Shaowen², TANG Mingsheng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: To facilitate engineering applications and quantitatively describe the damage level of concrete components, referring to the constitutive model of concrete mentioned in Appendix C of the current Chinese standard “Code for Design of Concrete Structures” GB/T 50010—2010, this paper proposes a damage assessment method for concrete components based on material damage. That is, the damage level of the component is defined according to the values of the damage evolution parameter. It is specified that when the damage evolution parameter $d_{c(t)}$ is less than the damage evolution parameter $d_{c(t),r}$ corresponding to the peak strain of concrete $\varepsilon_{c(t),r}$, the concrete component

* 收稿日期:2024-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52478198), National Natural Science Foundation of China(52478198)

作者简介:王红军(1984—),男,湖北黄梅人,同济大学博士研究生,正高级工程师

† 通信联系人, E-mail: rxdjtj@tongji.edu.cn

is in a non-damaged state (Level L1); when the damage evolution parameter $d_{c(t)}$ is greater than the damage evolution parameter $d_{c(t)_u}$ corresponding to the strain of concrete $\varepsilon_{c(t)_u}$, the concrete component is in a severely damaged state (Level L6); when the damage evolution parameter $d_{c(t)}$ is between the two values, the damage state of the concrete component (Levels L2 to L5) is evaluated by the linear interpolation method. To verify the rationality of this method, a refined model of 18 beams and 2 columns was established using the ABAQUS software, and numerical analysis were conducted. The simulation results show a good agreement with the test results. According to the damage assessment method proposed in this paper, most of the beam components under the peak load and the column components under the yield load are in a severely damaged state (Level L6). However, when using the damage assessment method based on the compressive strain of concrete as mentioned in the “Standard for Performance-Based Seismic Design of Building Structures” T/CECA 20024—2022, most of the components are in a moderately damaged state (Level L4), while a minor portion of the components are in a relatively severe damaged state (Level L5). From a macroscopic perspective, the damage assessment method for concrete components based on material damage proposed in this paper is more consistent with the actual expectations for evaluating the damage of concrete components and has a certain reference value.

Key words: concrete components; damage level; constitutive model; damage assessment method; damage evolution parameter; numerical analysis

随着抗震性能化概念^[1]的提出,正确且定量评估结构性能和结构损伤成为当下的研究重点之一^[2]. 现有规范^[3-5]通常借助层间位移角来判定结构性能,然而在对结构损伤进行定量评估时,其存在一定的局限性^[6],即未能充分反映地震作用的累积性和时程特征. Park和Ang^[7]较早关注到这一现象,提出了Park-Ang模型,开启了有关结构损伤研究的热潮^[8-10],但该模型没有区分塑性与损伤的物理机制^[11],目前局限于构件层次. 随着计算技术和材料本构关系^[12-14]的不断发展,基于材料的损伤评估模型逐渐兴起,此类模型以材料本构关系为基础,通过定义材料损伤变量,实现了从材料层面定义结构损伤,较基于构件的损伤评估模型,具备更高的科学性和预测精度,展现出较高的应用价值.

1 混凝土损伤本构模型

在研究混凝土本构关系的漫长历程中,经典弹性力学、塑性力学、断裂力学等多种理论曾先后被引入. 令人遗憾的是,深入研究表明,这些理论在反映混凝土受力的力学行为方面均存在一定局限性^[15]. 直到Dougill^[16]将损伤力学^[17]的基本概念用于描述混凝土的非线性,混凝土本构关系研究迈入新的发展阶段. 后续研究^[18]表明,宏观损伤演化的非线性源于

微观层次断裂应变分布的随机性,宏观的损伤演化规律,应该在微观层次的物理分析中寻求其内在机理与建模途径. 基于此,李杰等^[19-20]引入能量等效应变概念,将弹塑性损伤模型与单轴随机损伤模型相结合,进而将一维损伤演化法则推广至多维应力-应变空间,建立了混凝土多维弹塑性随机损伤本构模型,从而将微观断裂应变的随机性与宏观力学行为的非线性结合起来,实现了混凝土材料非线性与随机性的综合反映. 该模型不仅可以理想地反映混凝土材料特有的强度软化、刚度退化、单边效应等特殊行为,还可以反映混凝土在多维应力条件下的强度随机变化范围,为结构层次的非线性分析提供基础^[21]. 为精准描述混凝土的力学行为,我国现行规范《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)^[22][以下简称《混标》]附录C混凝土一维本构关系也引入了损伤概念,用混凝土单轴受拉损伤演化参数 d_t 和单轴受压损伤演化参数 d_c 来表征混凝土损伤程度. 《混标》提及的混凝土单轴应力-应变曲线如图1所示,其中混凝土单轴受拉应力-应变曲线可由式(1)~式(4)确定,由于 d_t 在 $x \leq 1$ 时,式(2)是基于试验结果直接拟合而来的,因此某些情况下损伤变量的计算结果可能出现负值,可按照式(5)~式(6)^[23]对式(2)进行修正.

$$\sigma = (1 - d_t)E_c \varepsilon \quad (1)$$

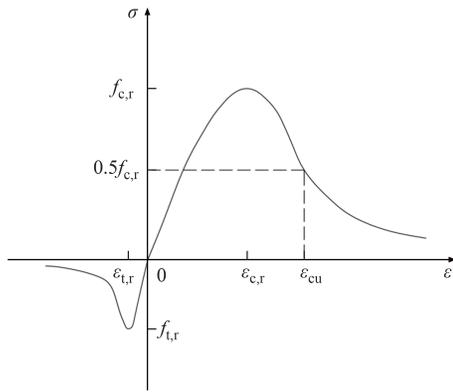


图 1 混凝土单轴应力-应变曲线^[22]

Fig.1 Uniaxial stress-strain curve of concrete^[22]

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t(1.2 - 0.2x^5), & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (3)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (4)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_t n_t}{n_t - 1 + x^{n_t}}, & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$n_t = 1/(1 - \rho_t) \quad (6)$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值,按《混标》附录 C 表 C.2.3 取用; $f_{t,r}$ 为混凝土的单轴抗拉强度代表值,其值根据实际情况选取,我国现行规范《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[4]指出,结构抗震性能设计时,应采用材料强度标准值进行构件验算,因此本文 $f_{t,r}$ 选取混凝土强度标准值; $\varepsilon_{t,r}$ 为单轴抗拉强度代表值 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变,按《混标》附录 C 表 C.2.3 取用; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

将《混标》附录 C 表 C.2.3 有关参数取值代入式(1)~式(4),不同混凝土强度等级对应的单轴受拉损伤演化参数见表 1。

《混标》中混凝土单轴受压应力-应变曲线可由式(7)~式(11)确定:

$$\sigma = (1 - d_c)E_c \varepsilon \quad (7)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (9)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (10)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (11)$$

式中: α_c 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段的参数值,按《混标》附录 C 表 C.2.4 取用; $f_{c,r}$ 为混凝土的单轴抗压强度代表值,其值根据实际情况选取,我国现行规范《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[4]指出,结构抗震性能设计时,应采用材料强度标准值进行构件验算,因此本文 $f_{c,r}$ 选取混凝土强度标准值; $\varepsilon_{c,r}$ 为单轴抗压强度代表值 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变,按《混标》附录 C 表 C.2.4 取用; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

表 1 不同混凝土强度等级对应的单轴受拉损伤演化参数

Tab.1 Damage evolution parameters for uniaxial tension corresponding to different concrete strength grades

强度等级	$f_{t,r}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{t,r}/(\times 10^{-6})$	α_t	$\varepsilon_u/\varepsilon_{t,r}$	$d_{t,r}$	d_u
C30	2.01	95	1.25	2.51	0.3	0.86
C35	2.20	100	1.53	2.26	0.3	0.85
C40	2.39	104	1.80	2.10	0.3	0.83
C45	2.51	107	1.95	2.02	0.3	0.83
C50	2.64	110	2.19	1.93	0.3	0.82
C55	2.74	112	2.36	1.87	0.31	0.82
C60	2.85	115	2.55	1.82	0.31	0.81
C65	2.93	116	2.69	1.79	0.31	0.81
C70	2.99	118	2.81	1.76	0.32	0.81
C75	3.05	119	2.91	1.74	0.32	0.8
C80	3.11	120	3.03	1.72	0.32	0.8

注: ε_u 为应力-应变曲线下降段应力等于 $0.5f_{t,r}$ 时的混凝土拉应变; $d_{t,r}$ 、 d_u 分别为 $\varepsilon_{t,r}$ 、 ε_u 对应的损伤演化参数。

将《混标》附录 C 表 C.2.4 有关参数取值代入式(7)~式(11),不同混凝土强度等级对应的单轴受压损伤演化参数见表 2。

2 构件损伤评估方法

地震作用下构件损伤主要体现在构件低周疲劳而导致的塑性累积损伤上,但又由于构件的塑性累积损伤与滞回耗能并不具有完全的对对应关系^[24-25],因此学者们大多从不同角度、不同结构形式出发,建立构件的地震损伤评估表达式。目前公认较为经典的构件损伤评估方法为 Park-Ang 模型^[7],其合理地反映了弹塑性变形和低周疲劳效应对构件地震损伤的影响。

《建筑结构抗震性能化设计标准》(T/CECA

表2 不同混凝土强度等级对应的单轴受压损伤演化参数

Tab.2 Damage evolution parameters for uniaxial compression corresponding to different concrete strength grades

强度等级	$f_{c,r}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{c,r}/(\times 10^{-6})$	α_c	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{c,r}$	$d_{c,r}$	d_{cu}
C30	20.1	1 472	0.75	2.86	0.54	0.92
C35	23.4	1 531	0.96	2.73	0.51	0.91
C40	26.8	1 589	1.17	2.49	0.48	0.90
C45	29.6	1 634	1.34	2.32	0.46	0.88
C50	32.4	1 678	1.50	2.20	0.44	0.87
C55	35.5	1 727	1.68	2.09	0.42	0.86
C60	38.5	1 769	1.85	2.03	0.40	0.85
C65	41.5	1 808	2.02	1.97	0.37	0.84
C70	44.5	1 844	2.18	1.91	0.35	0.82
C75	47.4	1 884	2.34	1.90	0.33	0.82
C80	50.2	1 922	2.49	1.90	0.31	0.82

注： ε_{cu} 为应力-应变曲线下降段应力等于 $0.5f_{c,r}$ 时的混凝土压应变； $d_{c,r}$ 、 d_{cu} 分别为 $\varepsilon_{c,r}$ 、 ε_{cu} 对应的损伤演化参数。

2024—2022)^[26][以下简称《性能化标准》]提及了一种构件损伤的评估方法,混凝土构件的性能水准可通过混凝土受压应变或受压损伤变量划分为L1级(无损伤状态)~L6级(严重损伤状态),具体见表3。但需要注意的是,《性能化标准》提及的受压损伤变量与《混标》提及的受压损伤演化参数计算方式不同,具体区别详见文献[22,26]。

为方便工程应用,定量描述混凝土构件的损伤等级,参考我国现行规范《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)附录C提及的混凝土本构关系,本文提出了一种基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法,根据损伤演化参数的数值,定义构件的损伤等级。规定当损伤演化参数 $d_{c(t)}$ 小于混凝土峰值应变对应的损伤演化参数 $d_{c(t),r}$ 时,混凝土构件处于无损伤状态(L1级);当损伤演化参数 $d_{c(t)}$ 大于混凝土应变 $\varepsilon_{c(t),u}$ 对应的损伤演化参数 $d_{c(t),u}$ 时,混凝土构件处于严重损伤状态(L6级);当损伤演化参数 $d_{c(t)}$ 处于二者之间时,通过线性插值的方法定义混凝土构件的损伤等级(L2~L5级),具体见表4。将表1、表2数据代入表4,不同混凝土强度等级下损伤演化参数对应的构件损伤等级如表5、表6所示。

表3 基于材料应变/损伤的混凝土构件损伤评估^[26]

Tab.3 Damage assessment of concrete components based on material strain/damage^[26]

类型	损伤等级					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
受压损伤变量	≤ 0.01	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.65	≤ 0.8	> 0.8
受压应变	$\leq 0.5\varepsilon_{c,r}$	$\leq 1.0\varepsilon_{c,r}$	$\leq 1.5\varepsilon_{c,r}$	$\leq 1.0\varepsilon_{cu}$	$\leq 1.5\varepsilon_{cu}$	$> 1.5\varepsilon_{cu}$

表4 基于材料损伤的混凝土构件损伤评估(损伤演化参数)

Tab.4 Damage assessment of concrete components based on material damage (damage evolution parameter)

损伤等级	宏观描述	受压损伤演化参数	受拉损伤演化参数
L1	无损伤	$\leq d_{c,r}$	$\leq d_{t,r}$
L2	轻微损伤	$\leq 0.25d_{cu} + 0.75d_{c,r}$	$\leq 0.25d_{tu} + 0.75d_{t,r}$
L3	轻度损伤	$\leq 0.50d_{cu} + 0.50d_{c,r}$	$\leq 0.50d_{tu} + 0.50d_{t,r}$
L4	中度损伤	$\leq 0.75d_{cu} + 0.25d_{c,r}$	$\leq 0.75d_{tu} + 0.25d_{t,r}$
L5	比较严重损伤	$\leq d_{cu}$	$\leq d_{tu}$
L6	严重损伤	$\geq d_{cu}$	$\geq d_{tu}$

表5 受拉损伤演化参数对应的损伤等级

Tab.5 Damage level corresponding to tensile damage evolution parameter

强度等级	损伤等级					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
C30	≤ 0.30	≤ 0.44	≤ 0.58	≤ 0.72	≤ 0.86	> 0.86
C35	≤ 0.30	≤ 0.44	≤ 0.58	≤ 0.71	≤ 0.85	> 0.85
C40	≤ 0.30	≤ 0.43	≤ 0.57	≤ 0.70	≤ 0.83	> 0.83
C45	≤ 0.30	≤ 0.43	≤ 0.57	≤ 0.70	≤ 0.83	> 0.83
C50	≤ 0.30	≤ 0.43	≤ 0.56	≤ 0.69	≤ 0.82	> 0.82
C55	≤ 0.31	≤ 0.44	≤ 0.57	≤ 0.69	≤ 0.82	> 0.82
C60	≤ 0.31	≤ 0.44	≤ 0.56	≤ 0.69	≤ 0.81	> 0.81
C65	≤ 0.31	≤ 0.44	≤ 0.56	≤ 0.69	≤ 0.81	> 0.81
C70	≤ 0.32	≤ 0.44	≤ 0.57	≤ 0.69	≤ 0.81	> 0.81
C75	≤ 0.32	≤ 0.44	≤ 0.56	≤ 0.68	≤ 0.80	> 0.80
C80	≤ 0.32	≤ 0.44	≤ 0.56	≤ 0.68	≤ 0.80	> 0.80

表6 受压损伤演化参数对应的损伤等级

Tab.6 Damage level corresponding to compressive damage evolution parameter

强度等级	损伤等级					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
C30	≤ 0.54	≤ 0.64	≤ 0.73	≤ 0.83	≤ 0.92	> 0.92
C35	≤ 0.51	≤ 0.61	≤ 0.71	≤ 0.81	≤ 0.91	> 0.91
C40	≤ 0.48	≤ 0.59	≤ 0.69	≤ 0.80	≤ 0.90	> 0.90
C45	≤ 0.46	≤ 0.57	≤ 0.67	≤ 0.78	≤ 0.88	> 0.88
C50	≤ 0.44	≤ 0.55	≤ 0.66	≤ 0.76	≤ 0.87	> 0.87
C55	≤ 0.42	≤ 0.53	≤ 0.64	≤ 0.75	≤ 0.86	> 0.86
C60	≤ 0.40	≤ 0.51	≤ 0.63	≤ 0.74	≤ 0.85	> 0.85
C65	≤ 0.37	≤ 0.49	≤ 0.61	≤ 0.72	≤ 0.84	> 0.84
C70	≤ 0.35	≤ 0.47	≤ 0.59	≤ 0.70	≤ 0.82	> 0.82
C75	≤ 0.33	≤ 0.45	≤ 0.58	≤ 0.70	≤ 0.82	> 0.82
C80	≤ 0.31	≤ 0.44	≤ 0.57	≤ 0.69	≤ 0.82	> 0.82

3 数值模拟验证

3.1 《混标》损伤演化参数在ABAQUS中的应用

ABAQUS关于混凝土材料提供了3种模型选

择^[27],分别是混凝土塑性损伤模型、混凝土弥散开裂模型及混凝土脆性断裂模型.混凝土塑性损伤模型最先由 Lubliner 等^[28]提出,并由 Lee 和 Fenves^[29]修正而来,由于其考虑了材料拉压性能的差异等,能较好地描述混凝土的非线性行为,被广泛应用于混凝土构件数值模拟中.需要注意的是,输入 ABAQUS 塑性损伤模型的混凝土损伤参数并非《混标》提及的损伤演化参数,而是塑性损伤因子 D ^[30-32].目前有关塑性损伤因子 D 的取值方法有很多^[33],本文塑性损伤因子 D 的取值方法参考文献[34],即能量等效假定确定.塑性损伤因子 D 与损伤演化参数 d 的转换见式(12):

$$D = 1 - (1 - d)^\beta \quad (12)$$

式中: β 为损伤调节系数,对于受压损伤,取值为0.5;对于受拉损伤,取值为0.35.

3.2 梁验证

3.2.1 试验梁介绍

为验证本文提出基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法的合理性,采用 ABAQUS 软件建立了 18 根梁的精细化模型,试验梁借鉴经典的“Bresler-Scordelis”^[35]和“Toronto Beams”^[36]试验,通常被认为是可以校准有限元分析模型的基准.试验梁基本信息见表7,具体参数详见文献[35-36].

3.2.2 模拟参数设置

混凝土和钢筋采用分离式建模,加载方式(三分点受弯、单调加载)和边界条件(一端固支、一端铰支)与试验保持一致.为防止混凝土应力集中,出现局部压碎现象,在加载点、支座与混凝土梁接触的位置均设置 20 mm 厚的钢板.本构关系为:混凝土本构关系选取混凝土塑性损伤模型,黏滞系数 v 等参数参考文献[27,37]确定,力学性能取实测值;钢筋采用双折线弹塑性模型,其强化阶段斜率取 $0.01E_s$ (E_s 为

表 7 试验梁基本信息

Tab.7 Basic information of the test beams

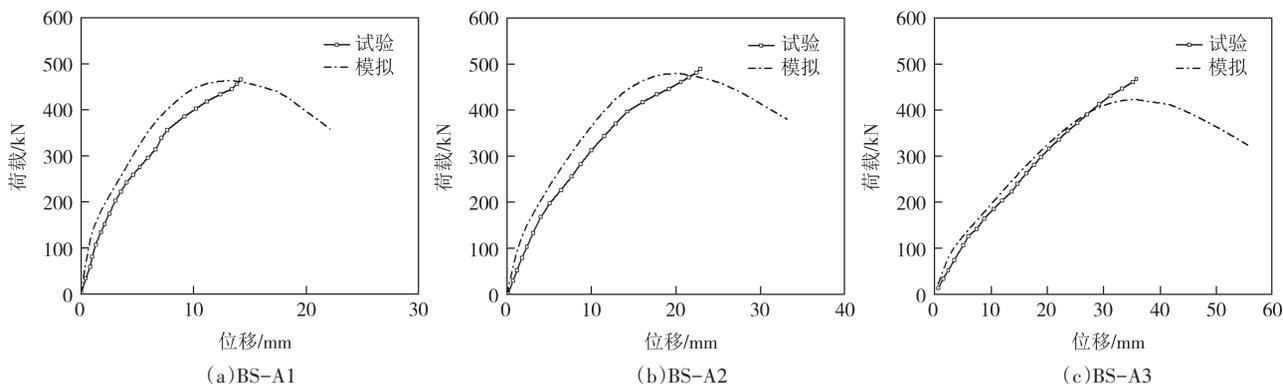
编号	f_c, f_t /MPa	$b \times h$ /mm \times mm	L /m	ρ_s /%	A_{sv1}, d (mm ² , mm)
BS-A1	24.1/3.86	307 \times 561	3 660	1.50	32.2/210
BS-A2	24.3/3.73	305 \times 559	4 570	1.89	32.2/210
BS-A3	35.1/4.34	307 \times 561	6 400	2.25	32.2/210
BS-B1	24.8/3.99	231 \times 556	3 660	2.01	32.2/190
BS-B2	23.2/3.76	229 \times 561	4 570	2.01	32.2/190
BS-B3	38.8/4.22	229 \times 556	6 400	2.53	32.2/190
BS-C1	29.6/4.22	155 \times 559	3 660	1.49	32.2/210
BS-C2	23.8/3.93	152 \times 559	4 570	3.04	32.2/210
BS-C3	35.1/3.86	155 \times 554	6 400	3.01	32.2/210
VS-A1	22.6/2.37	305 \times 552	3 660	1.43	32.2/210
VS-A2	25.9/3.37	305 \times 552	4 570	1.84	32.2/210
VS-A3	43.5/3.13	305 \times 552	6 400	2.26	25.7/168
VS-B1	22.6/2.37	229 \times 552	3 660	1.90	32.2/190
VS-B2	25.9/3.37	229 \times 552	4 570	1.90	32.2/190
VS-B3	43.5/3.13	229 \times 552	6 400	2.45	25.7/152
VS-C1	22.6/2.37	152 \times 552	3 660	1.67	32.2/210
VS-C2	25.9/3.37	152 \times 552	4 570	2.86	32.2/210
VS-C3	43.5/3.13	152 \times 552	6 400	2.86	25.7/168

注: f_c, f_t 分别为混凝土抗压、抗拉强度; b, h 分别为梁宽、梁高; L 为跨度; ρ_s 为下部钢筋配筋率; A_{sv1}, d 分别为箍筋截面面积、间距.

钢筋弹性模量),力学性能取实测值,泊松比取 0.3.单元类型:混凝土为 C3D8R,钢筋为 T3D2.相互关系:钢筋采用内置方式嵌入混凝土中,不考虑钢筋与混凝土的黏结滑移.加载方式:采用位移加载.

3.2.3 模型验证

模拟与试验所得跨中荷载-位移曲线对比如图2所示,模拟与试验的峰值荷载及其对应的位移对比见表8,可以看出:1)模拟跨中荷载-位移曲线除初始刚度较大外,其余与试验曲线较为接近;2)模拟与试验的峰值荷载误差不超过 10%.综上,模拟结果与试验数据的误差在可接受范围内,本文建立梁的数值模型可靠,可用于损伤分析和损伤评估.



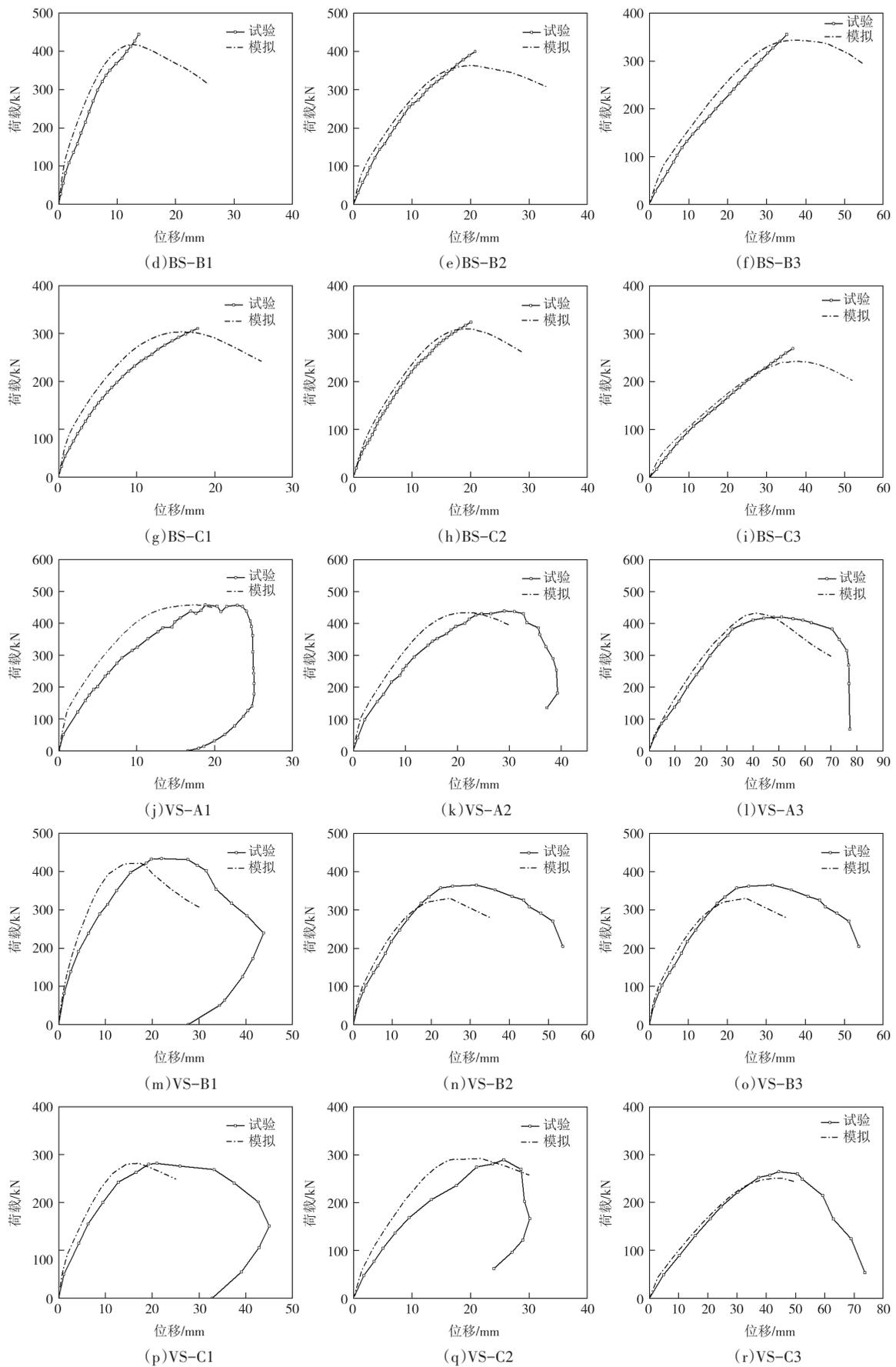


图2 模拟与试验跨中荷载-位移曲线对比

Fig.2 Comparison of mid-span load-displacement curves between simulation and test

表 8 梁试验与模拟分析结果对比

Tab.8 Comparison of test and simulation results of beams

编号	P_u^t /kN	P_u^f /kN	P_u^f/P_u^t	Δ^t /mm	Δ^f /mm	Δ^f/Δ^t
BS-A1	467	467	1.00	14.2	13.5	0.95
BS-A2	489	480	0.98	22.9	20.5	0.90
BS-A3	467	423	0.91	35.8	35.5	0.99
BS-B1	445	418	0.94	13.7	13.0	0.95
BS-B2	400	364	0.91	20.8	19.8	0.95
BS-B3	356	344	0.97	35.3	37.0	1.05
BS-C1	311	304	0.98	17.8	16.2	0.91
BS-C2	325	311	0.96	20.1	19.4	0.97
BS-C3	269	242	0.90	36.8	38.2	1.04
VS-A1	459	458	1.00	18.8	17.6	0.94
VS-A2	439	434	0.99	29.1	22.7	0.78
VS-A3	420	433	1.03	51.0	41.1	0.81
VS-B1	434	422	0.97	22.0	17.5	0.80
VS-B2	365	330	0.90	31.6	24.8	0.78
VS-B3	342	341	1.00	59.6	42.6	0.71
VS-C1	282	282	1.00	21.0	17.2	0.82
VS-C2	290	293	1.01	25.7	21.8	0.85
VS-C3	265	252	0.95	44.3	44.7	1.01

注: P_u^t 、 P_u^f 分别为试验、模拟峰值荷载; Δ^t 、 Δ^f 分别为试验、模拟峰值荷载对应的位移。

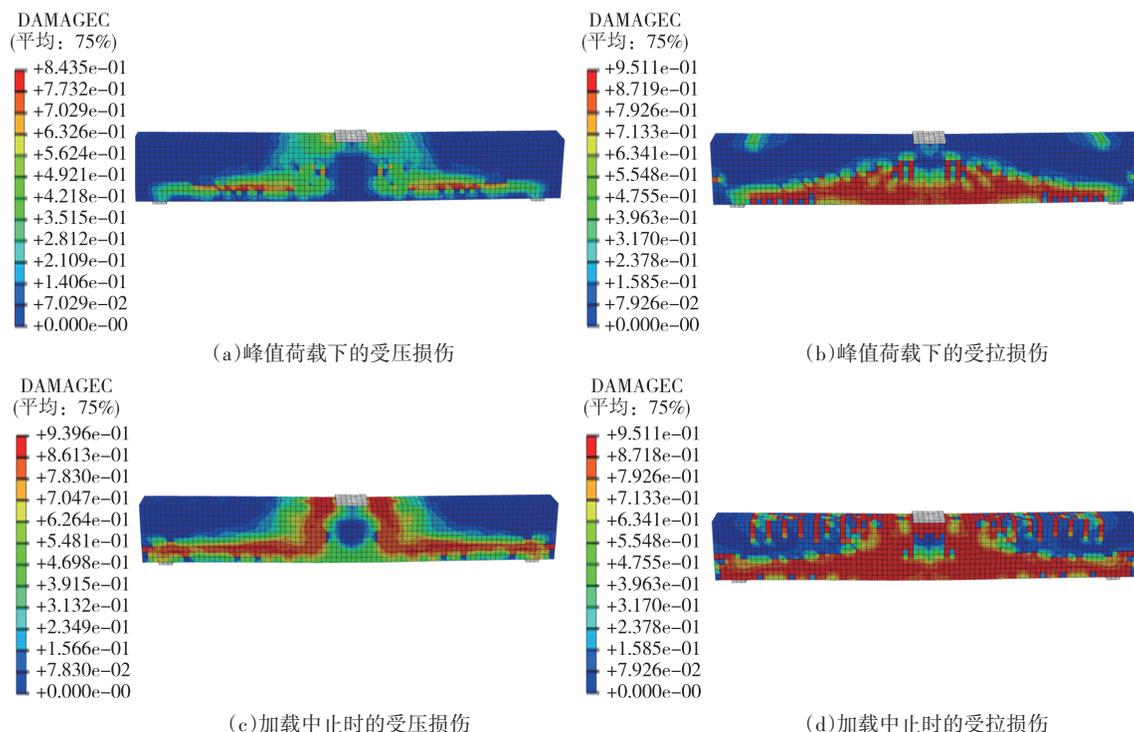


图 3 梁构件 BS-A1 混凝土损伤示意图

Fig.3 Schematic of the concrete damage of beam component BS-A1

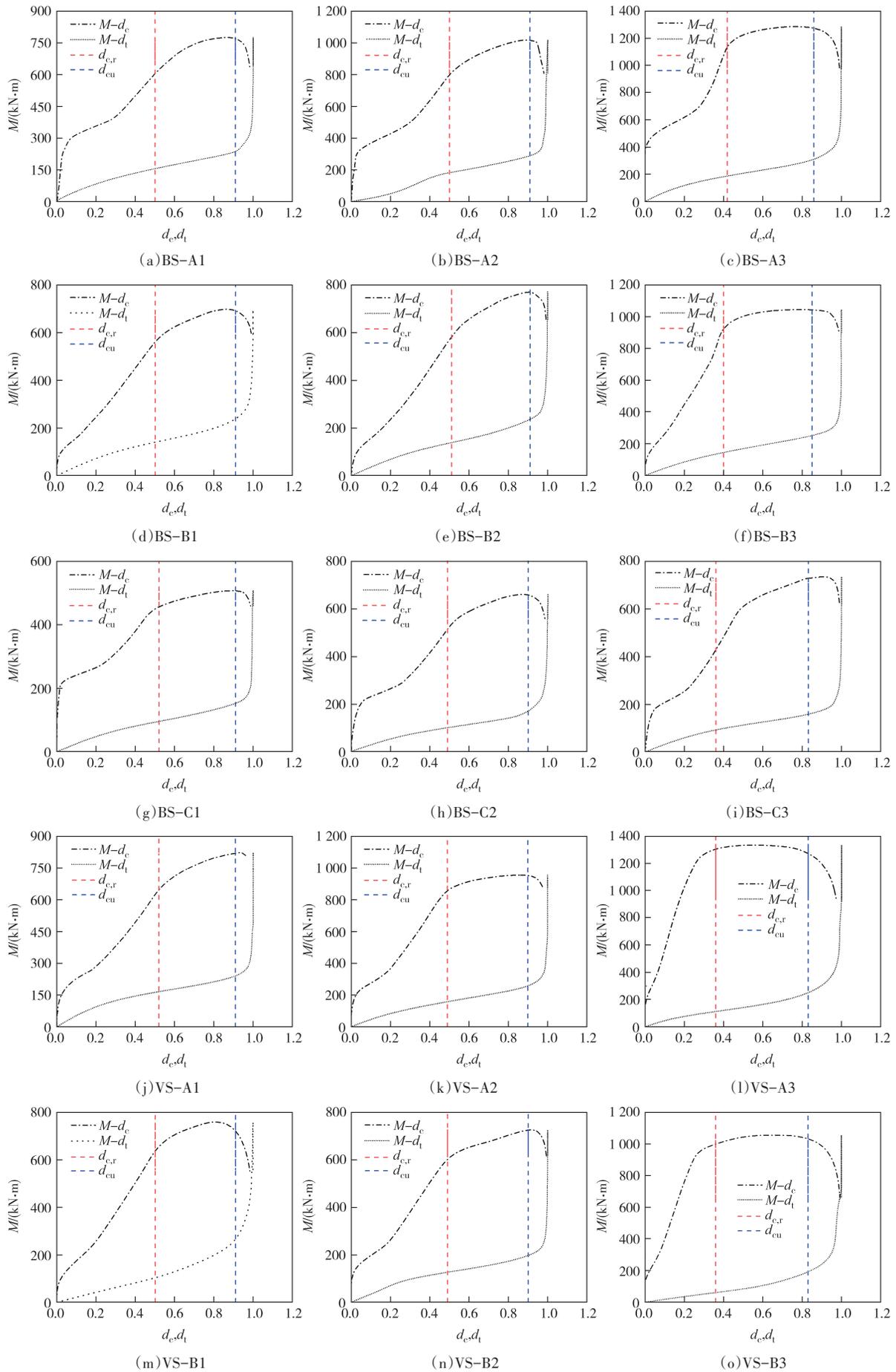
从图 4 可以看出,随着加载开始,受拉损伤演化参数 d_t 迅速增大至峰值,此时梁跨中截面弯矩不到峰值弯矩的一半.随着梁跨中截面的增大,受拉损伤

3.2.4 损伤分析与损伤评估

18 根梁的数值模型损伤过程基本相同,以梁构件 BS-A1 为例,峰值荷载下的混凝土受压、受拉损伤如图 3(a)、(b)所示,加载中止时的混凝土受压、受拉损伤如图 3(c)、(d)所示。

由于本文梁试件采取的加载方式为三分点受弯、单调加载,因此梁构件跨中截面弯矩最大,混凝土受压和受拉塑性损伤因子的最大值分别发生在梁跨中截面的上部和下部,故选取跨中梁顶面单元和梁底面单元作为分析对象.峰值荷载下梁顶部最大受压塑性损伤因子 D_c 约 0.60,梁底部受拉塑性损伤因子 D_t 超过 0.95. 随加载位移增加,梁顶部受压塑性损伤因子持续增大,终止时约 0.90. 为采用本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法定量评估梁构件损伤,分析跨中截面弯矩 M 和损伤演化参数 d 的关系,按照本文提及的式(12)将塑性损伤因子 D 转换为《混标》中的损伤演化参数 d , 18 根梁的跨中截面 $M-d$ 曲线如图 4 所示,其中 $d_{c,r}$ 和 $d_{c,u}$ 根据表 2 选取,位于数值中间的采用线性插值方法确定。

演化参数 d_t 基本维持在 1.0 左右;加载初期,受压损伤演化参数 d_c 变化较小,基本为 0. 随着加载位移的增大,受压损伤演化参数 d_c 接近线性发展增大至



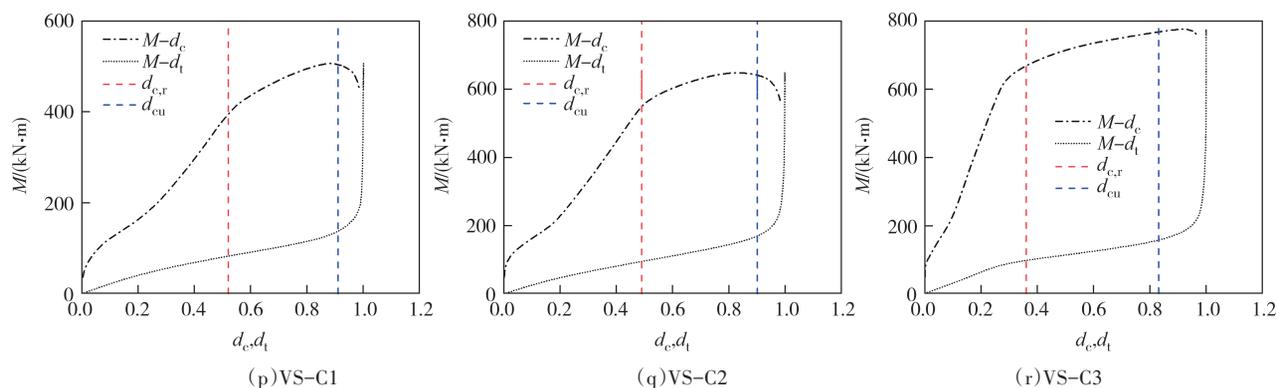


图 4 梁跨中截面 $M-d$ 曲线图

Fig.4 $M-d$ curves of the mid-span section of the beam

$d_{c,r}$, 以此作为转折点, d_c 在 $d_{c,r}$ 到 d_{cu} 段曲线斜率明显变缓. 待 d_c 超过 d_{cu} 后, 曲线迅速下降.

结合表 5、表 6, 采用本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法定量评估 18 根梁构件的评估结果见表 9. 可以看出, 对于梁构件, 加载至峰值荷载时, 依据本文提出的损伤评估方法判定, 绝大部分构件处于严重损伤状态(L6 级), 极少部分构件处于比较严重损伤状态(L5 级). 而采用《性能化标准》提及的基于混凝土受压应变的损伤评估方法判定, 绝大部分构件处于中度损伤状态(L4 级). 从宏观层面审视, 峰值荷载下, 梁构件上部出现混凝土压碎现象, 即梁构件不能继续承担荷载, 梁构件损伤应处于 L6 级, 本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法, 其评估结果更符合实际预期. 需要注意的是, 当采用受拉损伤演化参数 d_t 评估梁构件的损伤时, 由于 d_t 增长速度过快, 很快就达到 1.0, 因此梁构件损伤均处于 L6 级, 不具备差异性. 综上, 采用受压损伤演化参数 d_c 评估梁构件的损伤更为合理.

3.3 柱验证

3.3.1 试验柱介绍

为验证本文提出基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法的合理性, 采用 ABAQUS 软件建立了 2 根柱的精细化模型, 试验柱引自赵勇等^[38]的试验, 基本信息见表 10, 具体参数详见文献[38].

3.3.2 模型验证

混凝土和钢筋采用分离式建模, 加载方式和边界条件与试验保持一致. 本构关系、单元类型、相互关系等模拟参数设置参考梁构件, 限于篇幅, 此处不作具体介绍. 模拟与试验骨架曲线对比如图 5 所示, 模拟与试验的峰值荷载及其对应的位移对比见

表 9 峰值荷载下梁构件的损伤评估

Tab.9 Damage assessment of beam components under peak load

编号	参数	受压应变 ε_c/f ($\times 10^{-3}$)	受压损伤 演化参数 d_c	受拉损伤 演化参数 d_t
BS-A1	数值	3.07	0.81	0.99
	损伤等级	L4	L5	L6
BS-A2	数值	3.52	0.84	1.00
	损伤等级	L4	L5	L6
BS-A3	数值	2.90	0.86	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6
BS-B1	数值	3.44	0.88	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6
BS-B2	数值	3.48	0.83	1.00
	损伤等级	L4	L5	L6
BS-B3	数值	2.78	0.85	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6
BS-C1	数值	4.25	0.87	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6
BS-C2	数值	4.33	0.86	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6
BS-C3	数值	4.22	0.84	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6
VS-A1	数值	4.96	0.94	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6
VS-A2	数值	2.76	0.87	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6
VS-A3	数值	3.52	0.80	1.00
	损伤等级	L4	L5	L6
VS-B1	数值	2.87	0.83	1.00
	损伤等级	L4	L5	L6
VS-B2	数值	4.14	0.93	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6
VS-B3	数值	3.15	0.83	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6
VS-C1	数值	3.35	0.90	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6

续表 9

编号	参数	受压应变 $\epsilon_c / (\times 10^{-3})$	受压损伤演化参数 d_c	受拉损伤演化参数 d_t
VS-C2	数值	3.29	0.89	1.00
	损伤等级	L4	L6	L6
VS-C3	数值	5.70	0.93	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6

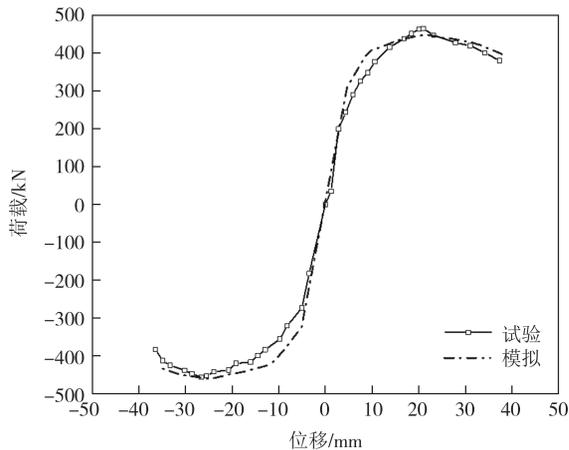
表 10 试验柱基本信息

Tab.10 Basic information of the test columns

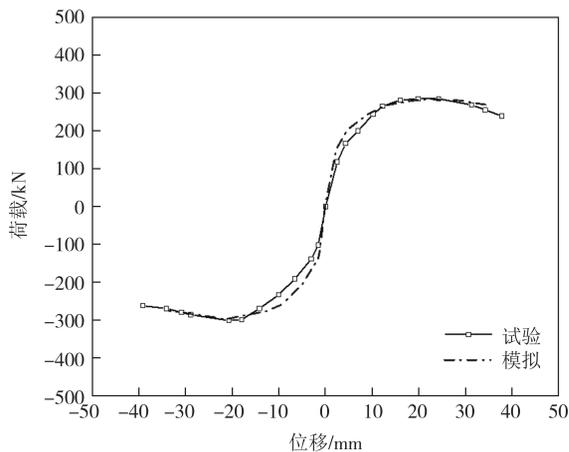
编号	n	f_{cu} / MPa	$b \times h \times H / \text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	配筋	
				纵筋	箍筋
DBC-1	0.45	40.9	400×400×1 600	4D _s 32+4D _s 10	D _s 10@100(3)
DBC-2	0.20	40.9	400×400×1 600	4D _s 25+4D _s 10	D _s 10@150(3)

注: n 为试验轴压比; f_{cu} 为与试件同条件养护试块的混凝土立方体抗压强度; b 、 h 、 H 分别柱截面尺寸、柱高; D_s 为 500 MPa 级带肋不锈钢筋。

表 11, 可以看出, 模拟与试验骨架曲线较为拟合, 峰值荷载误差较小, 表明本文建立柱的数值模型可靠, 可用于损伤分析和损伤评估。



(a) DBC-1



(b) DBC-2

图 5 模拟与试验骨架曲线对比

Fig.5 Comparison of skeleton curves between simulation and test

表 11 柱试验与模拟分析结果对比

Tab.11 Comparison of test and simulation results of columns

编号	加载方向	P_u^t / kN	P_u^s / kN	P_u^s / P_u^t	Δ^t / mm	Δ^s / mm	Δ^s / Δ^t
DBC-1	正向	465	449	0.97	21.0	23.6	1.12
	反向	456	461	1.01	26.6	24.7	0.93
DBC-2	正向	285	284	1.00	19.8	22.6	1.14
	反向	301	299	1.00	20.7	21.4	1.03

注: P_u^t 、 P_u^s 分别为试验、模拟峰值荷载; Δ^t 、 Δ^s 分别为试验、模拟峰值荷载对应的位移。

3.3.3 损伤分析与损伤评估

2 根柱的数值模型损伤过程基本相同, 以柱构件 DBC-1 为例, 屈服荷载下的混凝土受压、受拉损伤分别如图 6(a)、(b) 所示, 峰值荷载下的混凝土受压、受拉损伤分别如图 6(c)、(d) 所示。可以看出, 混凝土柱受压和受拉塑性损伤因子的最大值发生在柱根部, 故选取柱根部单元作为分析对象。结合梁构件的分析, 为采用本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法定量评估柱构件损伤, 分析柱根部弯矩 M 和受压损伤演化参数 d_c 的关系, 按照式 (12) 将塑性损伤因子 D 转换为《混标》中的损伤演化参数 d , 2 根柱的柱根部截面 $M-d_c$ 曲线如图 7 所示, 其中 $d_{c,r}$ 和 $d_{c,u}$ 根据表 2 选取, 位于确定数值中间的采用线性插值方法确定。可以看出: 1) 当施加轴压较高时, 混凝土损伤演化参数可能已有增长; 2) 正向加载时, 加载点对面的柱受压, 导致受压损伤演化参数不断增加。而反向加载时, 加载点对面的柱受拉, 因此受压损伤演化参数保持不变, 即图 7 中出现水平段的原因; 3) 随着截面弯矩的增大, 水平段长度越长。当加载至屈服荷载时, 受压损伤演化参数已超过 $d_{c,u}$, 最终稳定在 1.0。

结合表 5、表 6, 采用本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法, 定量评估 2 根柱构件的评估结果见表 12。加载至屈服荷载时, 依据本文提出的损伤评估方法判定, 2 根柱构件均处于严重损伤状态 (L6 级)。而采用《性能化标准》提及的基于混凝土受压应变的损伤评估方法判定, 2 根柱构件均处于比较严重损伤状态 (L5 级)。从宏观层面审视, 参考文献 [38], 加载至屈服荷载时, 试验柱底部已出现大量斜裂缝, 且自上而下向中和轴延伸, 表明混凝土已损伤严重, 损伤应处于 L6 级, 本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法, 其评估结果更符合实际预期。

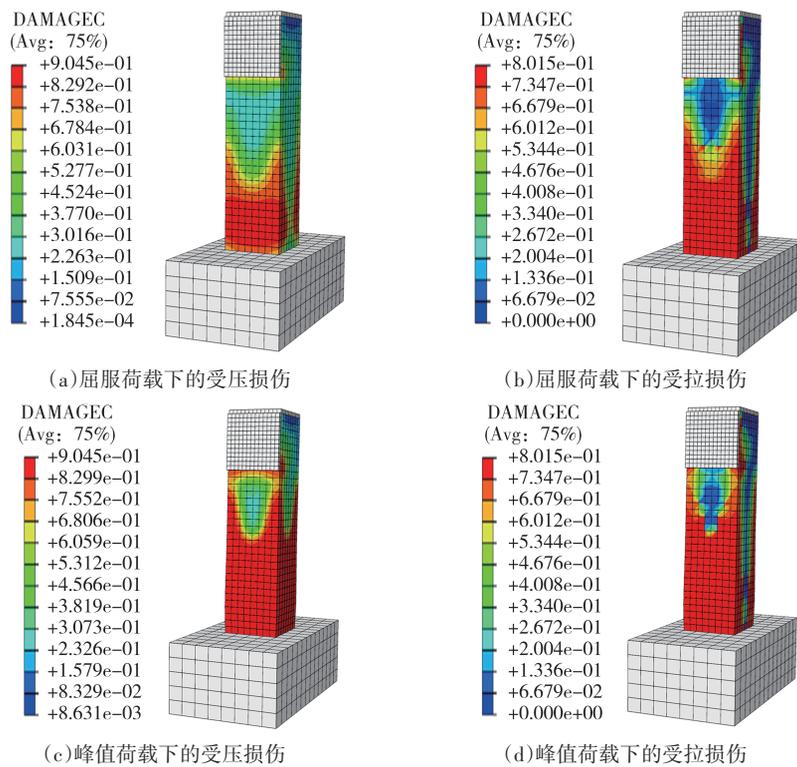
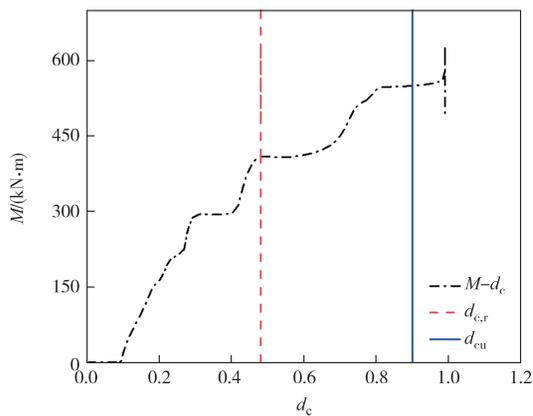
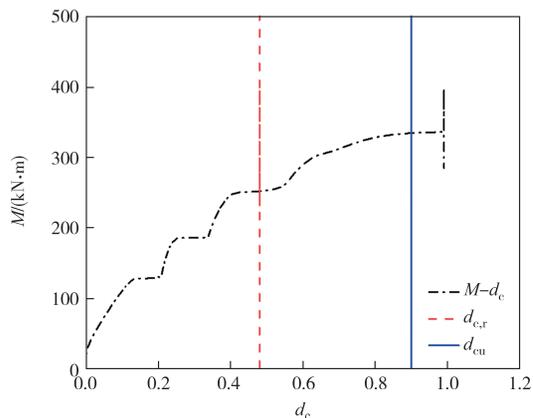


图 6 柱构件 DBC-1 混凝土损伤示意图

Fig.6 Schematic of the concrete damage of column component DBC-1



(a) DBC-1



(b) DBC-2

图 7 柱根部截面 $M-d_c$ 曲线图

Fig.7 $M-d_c$ curves of the root section of the column

表 12 峰值荷载下柱构件的损伤评估

Tab.12 Damage assessment of column components under peak load

编号	参数	受压应变 $\epsilon_c / (\times 10^{-3})$	受压损伤演化参数 d_c	受拉损伤演化参数 d_t
DBC-1	数值	4.28	0.95	0.99
	损伤等级	L5	L6	L6
DBC-2	数值	5.70	0.93	1.00
	损伤等级	L5	L6	L6

4 结论

为方便工程应用,定量描述混凝土构件的损伤等级,参考我国现行规范《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)附录 C 提及的混凝土本构关系,本文提出了一种基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法,根据损伤演化参数的数值,定义构件的损伤等级.为验证该方法的合理性,采用 ABAQUS 软件建立了 18 根梁和 2 根柱的精细化模型,并对其进行数值模拟,模拟结果与试验结果拟合良好,最后采用损伤演化参数对构件进行了损伤评估,主要结论如下:

1) 采用《混标》提及的受压、受拉损伤演化参数均可对混凝土构件损伤进行定量评估,但采用受压

损伤演化参数评估混凝土构件的损伤更为合理. 对某一特定混凝土强度等级而言, 不同损伤等级对应的损伤演化参数为固定值; 当混凝土强度等级逐步提高时, 混凝土应变 $\varepsilon_{c(t)u}$ 对应的损伤演化参数会随之不断减小.

2) 依据本文提出的损伤评估方法判定引用的18根梁和2根柱, 绝大部分构件处于严重损伤状态(L6级). 而采用《性能化标准》提及的基于混凝土受压应变的损伤评估方法判定, 绝大部分构件处于中度损伤状态(L4级), 少部分构件处于比较严重损伤状态(L5级). 从宏观层面审视, 本文引用的混凝土构件, 在评估时的损伤应处于L6级, 因此本文提出的基于材料损伤的混凝土构件损伤评估方法, 其评估结果更符合实际预期.

参考文献

- [1] SEAOC Vision 2000 Committee. Performance-based seismic engineering of building [R]. Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, USA, 1995.
- [2] BERTERO R D, BERTERO V V. Performance-based seismic engineering: the need for a reliable conceptual comprehensive approach [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 627-652.
- [3] 建筑抗震设计标准: GB/T 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
Code for seismic design of buildings: GB/T 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024. (in Chinese)
- [4] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [5] Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings: FEMA 356 [S]. Washington D C: Emergency Federal Agency Management, 2000.
- [6] 张耀庭, 陈杰, 杜晓菊, 等. 多层钢筋混凝土框架结构基于材料的损伤模型研究 [J]. 建筑结构, 2015, 45(6): 7-13.
ZHANG Y T, CHEN J, DU X J, et al. Material-based damage model research on multilayer RC frame structures [J]. Building Structure, 2015, 45(6): 7-13. (in Chinese)
- [7] PARK Y J, ANG A H. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [8] KUMAR S, USAMI T. Damage evaluation in steel box columns by cyclic loading tests [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(6): 626-634.
- [9] 王东升, 冯启民, 王国新. 考虑低周疲劳寿命的改进 Park-Ang 地震损伤模型 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(11): 41-49.
WANG D S, FENG Q M, WANG G X. A modified Park-Ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11): 41-49. (in Chinese)
- [10] 付国, 刘伯权, 邢国华. 基于有效耗能的改进 Park-Ang 双参数损伤模型及其计算研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(7): 84-90.
FU G, LIU B Q, XING G H. The research and calculation on modified Park-Ang double parameter seismic damage model based on energy dissipation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 84-90. (in Chinese)
- [11] 邵长江, 钱永久, 潘毅. 基于损伤理论的混凝土结构震害评估方法 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊2): 232-236.
SHAO C J, QIAN Y J, PAN Y. Seismic disaster assessment approach of concrete structures based on damage theory [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup.2): 232-236. (in Chinese)
- [12] 王中强, 余志武. 基于能量损失的混凝土损伤模型 [J]. 建筑材料学报, 2004, 7(4): 365-369.
WANG Z Q, YU Z W. Concrete damage model based on energy loss [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(4): 365-369. (in Chinese)
- [13] 吴建营, 李杰. 混凝土的连续损伤模型和弥散裂缝模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(11): 1428-1432.
WU J Y, LI J. Continuum damage mechanics model and smeared-crack model for concrete [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(11): 1428-1432. (in Chinese)
- [14] 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.
NIE J G, WANG Y H. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-67. (in Chinese)
- [15] 李杰, 任晓丹. 混凝土静力与动力损伤本构模型研究进展述评 [J]. 力学进展, 2010, 40(3): 284-297.
LI J, REN X D. A review on the constitutive model for static and dynamic damage of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(3): 284-297. (in Chinese)
- [16] DOUGILL J W. On stable progressively fracturing solids [J]. Zeitschrift Für Angewandte Mathematik und Physik ZAMP, 1976, 27(4): 423-437.
- [17] LEMAÎTRE J, DESMORAT R. Engineering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failures [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [18] 李杰. 混凝土随机损伤力学的初步研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1270-1277.
LI J. Research on the stochastic damage mechanics for concrete materials and structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(10): 1270-1277. (in Chinese)
- [19] 李杰, 杨卫忠. 混凝土弹塑性随机损伤本构关系研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 31-38.
LI J, YANG W Z. Elastoplastic stochastic damage constitutive law for concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 31-38. (in Chinese)

- [20] LI J, REN X D. Stochastic damage model for concrete based on energy equivalent strain[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(11/12): 2407-2419.
- [21] 李杰,任晓丹. 混凝土随机损伤力学研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4): 20-29.
LI J, REN X D. Recent developments on stochastic damage mechanics for concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4): 20-29. (in Chinese)
- [22] 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2024.
Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024. (in Chinese)
- [23] 任晓丹,李杰. 混凝土损伤与塑性变形计算[J]. *建筑结构*, 2015, 45(2): 29-31.
REN X D, LI J. Calculation of concrete damage and plastic deformation [J]. *Building Structure*, 2015, 45(2): 29-31. (in Chinese)
- [24] 王振宇,刘晶波. 建筑结构地震损伤评估的研究进展[J]. *世界地震工程*, 2001, 17(3): 43-48.
WANG Z Y, LIU J B. The advances of studies on seismic damage assessment of building structures [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2001, 17(3): 43-48. (in Chinese)
- [25] 白绍良,黄宗明,肖明葵. 结构抗震设计的能量分析方法研究述评[J]. *建筑结构*, 1997, 27(4): 54-58.
BAI S L, HUANG Z M, XIAO M K. Review of energy analysis methods for seismic design of structures [J]. *Building Structure*, 1997, 27(4): 54-58. (in Chinese)
- [26] 建筑结构抗震性能化设计标准: T/CECA 20024—2022[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2022.
Standard for performance-based seismic design of building structures: T/CECA 20024—2022 [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2022. (in Chinese)
- [27] ABAQUS, Inc. Analysis user's manual I_V [M]. Version 6. 11. Rhode Island, USA: ABAQUS, Inc, Dassault Systèmes, 2011.
- [28] 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.
- [29] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [30] 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.
ZHANG J, WANG Q Y, HU S Y, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. *Building Structure*, 2008, 38(8): 127-130. (in Chinese)
- [31] 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.
LIU W, XU M, CHEN Z F. Parameters calibration and verification of concrete damage plasticity model of ABAQUS [J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(Sup.1): 167-171. (in Chinese)
- [32] 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.
FANG Z H, ZHOU H J, LAI S Y, et al. Choose of ABAQUS concrete stress-strain curve [J]. *Building Structure*, 2013, 43(Sup.2): 559-561. (in Chinese)
- [33] 秦浩,赵宪忠. ABAQUS混凝土损伤因子取值方法研究[J]. *结构工程师*, 2013, 29(6): 27-32.
QIN H, ZHAO X Z. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model [J]. *Structural Engineers*, 2013, 29(6): 27-32. (in Chinese)
- [34] 姚方宝,关群,王浦东. 基于ABAQUS塑性损伤模型损伤因子的仿真分析[J]. *结构工程师*, 2019, 35(5): 76-81.
YAO F B, GUAN Q, WANG P D. Simulation analysis of damage factor based on ABAQUS damaged plasticity model [J]. *Structural Engineers*, 2019, 35(5): 76-81. (in Chinese)
- [35] BRESLER B, SCORDELIS A C. Shear strength of reinforced concrete beams [J]. *ACI Journal*, 1963, 60(1): 51-74.
- [36] VECCHIO F J, SHIM W. Experimental and analytical reexamination of classic concrete beam tests [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(3): 460-469.
- [37] 陆新征,叶列平,缪志伟,等. 建筑抗震弹塑性分析:原理、模型与在ABAQUS, MSC. MARC和SAP2000上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LU X Z, YE L P, MIAO Z W, et al. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake: theory, model and implementation on ABAQUS, MSC. MARC and SAP2000 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [38] 赵勇,张琛,王晓锋. 配置高延性不锈钢钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 803-810.
ZHAO Y, ZHANG C, WANG X F. Experimental research on seismic behaviors of concrete columns with high-ductility stainless steel reinforcements [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(6): 803-810. (in Chinese)