DOI:10.11918/202502013

基于单元材料积分损伤模型的钢筋混凝土框架结构损伤

张昊宇[1],张亮泉[2],张云波[2],刘梦鸽[2]

(1.中国地震局地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所),哈尔滨 150080;
2.东北林业大学 土木与交通学院,哈尔滨 150040)

摘 要:针对传统损伤指标在评估三维地震动加载下钢筋混凝土(RC)框架结构损伤程度时精度不高的问题,介绍一种基于单元材料积分的RC框架结构楼层地震损伤评估模型——Diem(damage indices of integration of element material)。该模型基于已有的混凝土及钢筋的材料损伤指标,采用考虑距形心轴距离的加权平均法,构造具有方向属性的塑性铰截面损伤指标。在此基础上,进一步构建基于损伤加权的单根RC框架柱损伤模型,以及结合损伤和轴力混合加权的楼层损伤模型。以一栋实际震损的RC框架结构为分析对象,采用OpenSEES软件进行了非线性IDA分析,并基于OpenSEES输出的柱曲率及轴力数据,使用自编程序对单柱及薄弱层进行基于Diem模型的损伤分析。结果表明:Diem模型计算的框架单柱及楼层损伤程度与实际震损相符;利用Diem方向性计算得到的"损伤环"与实际震害的残余侧移方向一致,能有效表征结构不同方向上的损伤演化特征。Diem损伤模型适用于实际三维地震动下的RC结构精细损伤评估。

关键词:钢筋混凝土框架;损伤指标;塑性铰;三维地震动;轴力波动
中图分类号:TU375.4 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0061-11

Damage of reinforced concrete frame structures using integral damage model of element material

Zhang Haoyu[1], Zhang Liangquan[2], Zhang Yunbo[2], Liu Mengge[2]

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of traditional damage indices when evaluating the damage degree of reinforced concrete (RC) frame structures under three-dimensional (3D) ground motion loading, this paper presented a storey seismic damage assessment model for RC frame structures based on the integral of element material, namely damage indices of integration of element material (Diem). Based on the existing material damage indices of concrete and steel bar, this model adopted the weighted average method considering the distance from the centroidal axis to construct the plastic hinge section damage index with directional properties. On this basis, it further constructed a damage model for a single RC frame column based on damage weighting and a storey damage model combining mixed weighting of damage and axial force. Taking an actually seismically damaged RC frame structure as the analysis object, this paper performed nonlinear incremental dynamic analysis (IDA) using OpenSEES software and utilized the self-compiled program to conduct Diem-based damage analysis for single columns and weak storeys based on the column curvature and axial force data output by OpenSEES. The results show that the damage degrees of single frame columns and storeys calculated by the Diem model are consistent with actual seismic damage. The "damage ring" obtained through calculation using the directional property of Diem is consistent with the residual drift direction of actual seismic damage and can effectively characterize the structural damage evolution characteristics in different directions. The Diem damage model is suitable for refined damage assessment of RC structures under actual 3D ground motion.

Keywords: reinforced concrete frame; damage index; plastic hinge; 3D ground motion; axial force fluctuation

RC框架结构在实际地震动作用下的损伤评价至关重要,而损伤指标是评估所需的标尺。结构实际地震反应常表现出显著的三维特性[1-3],水平位移轨迹具有双向性和随机性,框架柱轴力可能出现

收稿日期:2025-02-13;**录用日期**:2025-06-11;**网络首发日期**:2025-11-17
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251117.1428.007
基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费(2019B12);国家自然科学基金(51108433,202402AC080003);黑龙江省自然科学基金(LH2024E015);云南省科技厅重大科技专项计划(202402AC080003)
作者简介:张昊宇(1978—),男,副研究员
通信作者:张亮泉,zhangliangquan2006@163.com

波动,这些因素都会影响结构构件的损伤程度[4-5]。然而传统损伤指标,包括层间位移和塑性铰转角[6-7]及以 Park-Ang 指标[8]为代表的双参数损伤指标,主要基于恒定轴力和水平单向滞回加载的试验和模拟结果得出。针对双向受力 RC 柱的损伤指标则多为基于恒定轴力、规则双向加载下的滞回曲线构造而成[9-10],仍无法定量衡量轴力波动和水平地震动对损伤的影响。

基于材料的损伤模型认为整体结构损伤是微观材料损伤的宏观体现。对于钢筋混凝土框架结构,柱塑性铰处的钢筋屈曲和混凝土压碎联合作用导致了柱的损伤。因此,基于材料的损伤指标能够从机制层面而非反应结果(滞回曲线)评估结构震损,适用于三维地震动作用下的结构损伤分析。典型成果包括根据纤维单元中钢筋和混凝土材料的损伤指标计算构件的刚度退化指标等[11-13]。

目前,已有的基于材料的损伤模型多数仍集中于塑性铰截面和单个构件层面的评估,对整体楼层和结构的损伤评估模型仍有待研究。作者在前期研究中构建了基于材料的塑性铰截面损伤模型和单个悬臂 RC 框架柱的 Diem(damage indices of integration of element material)损伤模型[14],而结构层面的损伤模型有待研究。多位学者使用传统损伤指标,采用基于构件损伤指数加权平均得到整体结构的损伤模型[15-16]为本研究提供了宝贵借鉴。在此基础上,首先,对已完成的 RC 框架柱塑性铰截面 Diem 损伤模型进行简介,再通过加权组合方式建立 Diem 两端固结的单根 RC 框架柱的损伤模型,之后,对单层所有框架柱损伤指标进行加权组合建立楼层 Diem 损伤模型。以一个实际震损框架结构为例验证了损伤模型的合理性。最后,分析了方向差异对损伤的影响,展示 Diem 的特性。

1 Diem 塑性铰截面损伤模型介绍

塑性铰截面损伤模型可分为以下两部分。

1.1 材料损伤指数

材料损伤指数定义了塑性铰截面中材料纤维单元的损伤。目前,常见的集中塑性的杆系有限元模型塑性铰截面如图 1 所示,纤维单元按种类分为钢筋单元、约束混凝土单元及保护层非约束混凝土单元。因此,分别定义约束(含非约束)混凝土损伤指数和钢筋损伤指数。基于 Mander 约束混凝土滞回本构模型[17]和考虑受压屈曲的钢筋滞回本构模型[17-18],定义如下 Diem 混凝土材料损伤和钢筋材料损伤模型。

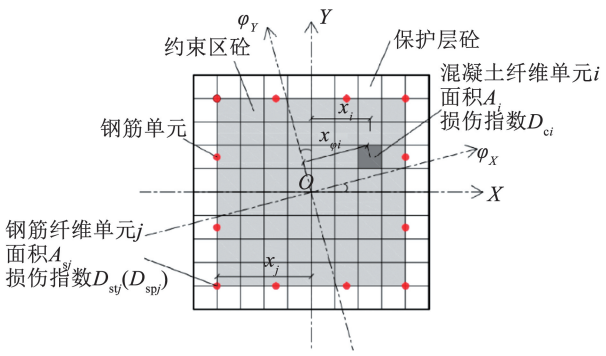


图 1 纤维单元截面损伤计算示意

Fig. 1 Damage calculation for fiber element section

混凝土以受压为主,故定义受压损伤作为混凝土损伤的主要指标。定义混凝土受压损伤指数为式(1),其指数与应变关系曲线如图 2 所示。图 2 同时给出了对应的混凝土受压应力-应变关系曲线。式(1)求得的损伤指数可理解为混凝土应力下降幅度同极限应力与峰值应力差值的比值。

$$D_{cc}=\begin{cases}0,\varepsilon_c\leqslant\varepsilon_{c0}\\ \dfrac{E_{c0}\varepsilon_c-\sigma_c}{E_{c0}\varepsilon_{cu}-\sigma_{cu}},\varepsilon_{c0}<\varepsilon_c\leqslant\varepsilon_{cu}\\ \dfrac{f_{cc}-\sigma_c}{f_{cc}-\sigma_{cu}},\varepsilon_c>\varepsilon_{cu}\end{cases}\tag{1}$$

式中:ε_c 为单元混凝土达到的最大压应变;ε_{c0} 为混凝土压损伤起点应变;E_{c0} 为 ε_{c0} 对应的割线模量;f_{cc} 为约束混凝土峰值应力;ε_{cu} 为混凝土极限应变,参考 Mander 模型[17]计算;σ_{cu} 为 ε_{cu} 对应的受压曲线应力值。

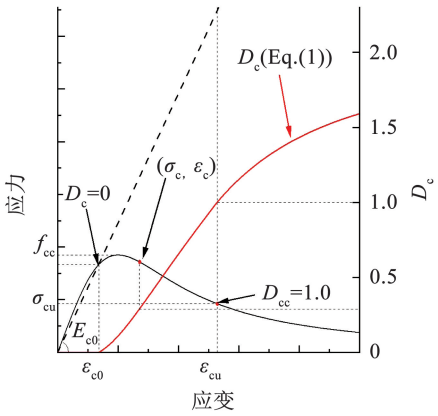


图 2 混凝土损伤曲线

Fig. 2 Concrete damage curves

钢筋损伤指数可分为压损伤及拉损伤。钢筋受拉损伤指数 D_{st} 定义为式(2),曲线如图 3(a)所示。图 3 同时给出了对应的钢筋应力-应变关系曲线,采用了受压屈曲钢筋滞回本构模型[18]。

$$D_{st}=\begin{cases}\dfrac{\varepsilon_{smax}-\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{nsu}-\varepsilon_{sy}}, \varepsilon_{smax}\leqslant\varepsilon_{su}\\ \dfrac{\varepsilon_{su}-\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{nsu}-\varepsilon_{sy}}+\dfrac{f_{su}-\sigma_s}{f_{su}}, \varepsilon_{smax}>\varepsilon_{su}\end{cases} \tag{2}$$

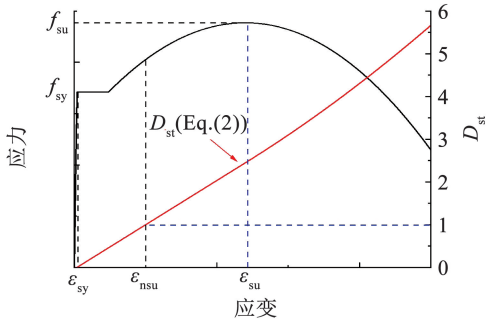
式中：ε_{smax}为计算时刻钢筋达到的最大拉应变，ε_{sy}为钢筋屈服应变，ε_{su}为钢筋极限应变，ε_{nsu}为钢筋名义极限应变[19]，f_{su}为钢筋极限强度，σ_s为钢筋应力。

钢筋压损伤由钢筋受压屈曲导致的应力下降幅度来定义，为钢筋受压应力应变骨架曲线的应力与相同应变对应的受拉应力应变骨架曲线的应力差，与混凝土极限应变时应力下降幅度在钢筋强度上的等比例映射之比来定义，即

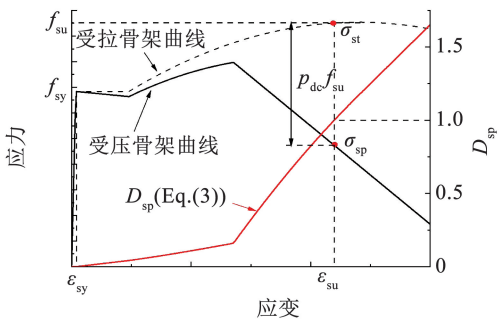
$$D_{sp}=\begin{cases}0, \varepsilon_{sp}\leqslant\varepsilon_{sy}\\ \dfrac{\sigma_{st}-\sigma_{sp}}{p_{dc}f_{su}}, \varepsilon_{sp}>\varepsilon_{sy}\end{cases} \tag{3}$$

式中：D_{sp}为钢筋受压损伤指数；ε_{sp}为钢筋压应变最大值；σ_{st}为对应于 ε_{sp}的应力值；p_{dc}为应力减小系数，按式(4)计算，代表 $D_{sp}=D_c$时，屈曲钢筋的应力下降比例与混凝土的应力下降比例相对应。

$$p_{dc}=\frac{\sigma_{cu}}{f_{cc}} \tag{4}$$



(a) 钢筋受拉损伤模型



(b) 钢筋受压损伤模型

图 3　钢筋损伤曲线

Fig. 3　Steel bar damage curves

1.2　塑性铰截面损伤

塑性铰截面损伤指数定义为各个纤维单元材料损伤指数按照单元到形心轴的距离进行加权积分，见式(5)。如图 1，形心轴方向可根据分析需要任意指定，由此不同方向对应的损伤指数可分别计算。

$$D_{sct\varphi}=\frac{\sum\limits_{x>0}A_{ci}x_{\varphi i}f_{ci}D_{ci}+\sum\limits_{j=1}^{ns}A_{sj}x_{\varphi j}f_{sj}D_{si}}{\sum\limits_{x>0}A_{ci}x_{\varphi i}f_{ci}+\sum\limits_{j=1}^{ns}A_{sj}x_{\varphi j}f_{sj}} \tag{5}$$

式中：A_{ci}为第 i 个混凝土单元的面积；$x_{\varphi i}$为第 i 个混凝土单元形心至截面形心轴 φ_Y的距离；f_{ci}为第 i 个混凝土单元抗压强度，核心区混凝土取 f_{cc}，保护层混凝土取f_c[17]；D_{ci}为第 i 个混凝土单元的混凝土损伤指数，考虑到受拉开裂混凝土对截面压弯承载影响很小，$D_{sct\varphi}$的加权平均仅考虑 $x_{\varphi i}>0$ 的混凝土单元；A_{sj}为第 j 根纵筋的面积；$x_{\varphi j}$为第 j 根钢筋至截面形心轴 φ_Y的距离；D_{si}为第 i 个钢筋的损伤指数，受拉侧($x<0$)取 D_{st}，受压侧($x>0$)取 D_{sp}。

式(5)可理解为在指定方向上受损后的受弯承载力与无损状态下受弯承载力的比值。当 $D_{sct\varphi}=1$时，塑性铰截面处于如下状态：在形心轴方向 φ 上，受压混凝土的加权平均压应变达到极限应变 ε_{su}，受拉钢筋的加权平均应变达到名义极限应变 ε_{nsu}，受压钢筋发生明显屈曲。处于该状态的钢筋混凝土压弯曲截面，认为其达到破坏状态应是合理的。$D_{sct\varphi}>1$表明构件截面超过了安全承载力限值，这与钢筋混凝土构件常规破坏准则一致。

2　Diem 框架柱及楼层损伤模型

在实际地震灾害中，RC 框架最常见的破坏模式为柱端塑性铰破坏[20-21]，因此，基于柱铰破坏模式构建 RC 框架柱及楼层的损伤模型。

2.1　Diem 框架单柱损伤模型

RC 框架柱倒塌破坏的主要影响因素为上下柱端塑性铰截面的承载力退化以及重力二阶效应的联合作用，如图 4 所示。基于该思路，提出如式(6)所示的 RC 框架柱损伤指标。

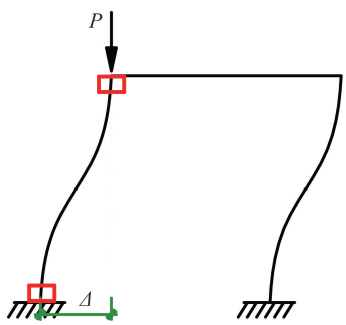


图 4　框架柱损伤模型示意

Fig. 4　Damage model of frame column

$$D_{\mathrm{clp}\varphi}=D_{\mathrm{sct}\varphi}+\alpha_{\mathrm{g}}D_{\mathrm{g}\varphi} \tag{6}$$

式中：$D_{\mathrm{sct}\varphi}$为方向角 φ 上的框架柱塑性铰截面损伤指标，由上下端塑性铰截面损伤指标加权计算得到，采用式(7)计算；$D_{\mathrm{g}\varphi}$为方向角 φ 上的 P-Δ 效应损伤指标，按式(8)计算；α_{g}为 P-Δ 效应调整系数，前期研究基于骨架曲线下降 80% 的 RC 柱的破坏准则，通过参数分析给出了 $\alpha_{\mathrm{g}}=3.0$ 的建议取值[13]。式(6)的物理意义为：单根框架柱由 P-Δ 效应引起的弯矩荷载增量同塑性铰截面材料损伤造成的弯矩承载力下降之和与完好状态下抗侧弯矩承载能力的比值。

$$D_{\mathrm{sct}\varphi}=\lambda_{\mathrm{b}}D_{\mathrm{sctb}\varphi}+\lambda_{\mathrm{t}}D_{\mathrm{sctt}\varphi} \tag{7}$$

式中：λ_{b}为柱底部塑性铰损伤加权系数，λ_{t}为柱顶部塑性铰损伤加权系数，$D_{\mathrm{sctb}\varphi}$为方向 φ 上的下柱端损伤系数，$D_{\mathrm{sctt}\varphi}$为方向 φ 上的上柱端损伤系数。

$$D_{\mathrm{g}\varphi}=\frac{P\Delta_{\varphi}}{M_{\mathrm{Eu}\varphi}-M_{\mathrm{u}\varphi}} \tag{8}$$

式中：P 为轴力(受压为正)；Δ_{φ}为计算时刻柱端位移在计算方向 φ 上的位移分量；$M_{\mathrm{u}\varphi}$为极限位移点对应的塑性铰截面弯矩，近似按照单推时水平力下降至峰值荷载的 80% 作为判断依据计算；$M_{\mathrm{Eu}\varphi}$为塑性铰截面在计算方向 φ 上的“无损材料假想弯矩”[13]，按照钢筋为理想弹性材料、混凝土为理想弹塑性材料求得截面在到达 $M_{\mathrm{u}\varphi}$时的曲率所对应的弯矩。由此算得的 $D_{\mathrm{g}\varphi}$表示重力二阶效应产生的塑性铰截面弯矩下降值占材料损伤造成的弯矩下降总值的比值。

已有损伤模型中的加权方式主要可归为以下 4 类[17-18]：1)取上下柱端塑性铰截面的损伤最大值；2)取上下柱端塑性铰截面损伤平均值；3)按柱端弯矩承载力大小确定权重系数；4)将损伤比作为加权系数。

上述方法中，方法 1)仅考虑了破坏较重一侧，忽略了损伤较小柱端；方法 2)可能会在柱两端塑性铰破坏差异较大时给出偏小的整体损伤指数；方法 3)考虑到常规框架柱在同一楼层柱顶柱底的配筋和轴力往往大致相同，得到的加权系数通常在 0.5 左右，与方法 2)接近；方法 4)在兼顾上下塑性铰破坏贡献的同时适当增加了破坏较重一端的权重，较为合理。因此，采用方法 4)构建单柱损伤，即式(9)。符号物理意义同前。

$$D_{\mathrm{clp}\varphi}=\frac{D_{\mathrm{sctb}\varphi}^{2}+D_{\mathrm{sctt}\varphi}^{2}}{D_{\mathrm{sctb}\varphi}+D_{\mathrm{sctt}\varphi}}+\alpha_{\mathrm{g}}D_{\mathrm{g}\varphi} \tag{9}$$

2.2 Diem 楼层损伤模型

楼层抗侧承载能力由该层所有框架柱组成，楼层的损伤可视为是由该层所有框架柱的损伤共同导致。因此，构建 Diem 结构楼层损伤模型如式(10)所示。

$$D_{\mathrm{story}\varphi}=\sum_{i=1}^{m}\lambda_{i}D_{\mathrm{clp}i\varphi} \tag{10}$$

式中：D_{storey}为楼层损伤指标；$D_{\mathrm{clp}i}$为该楼层中第 i 根框架柱的损伤指标，由式(9)计算；λ_{i}为第 i 根框架柱所取的加权系数；m 为楼层框架柱的根数。

已有相关研究报道中由构件到楼层的损伤加权系数 λ_{i}可分为 3 类[17-18]，即基于构件耗能的加权、损伤加权和重力荷载加权。考虑到 Diem 独立于滞回曲线，可排除基于构件滞回耗能的加权方式；考虑到柱承担的重力荷载越大，其对整体结构稳定承载的影响越大，故未考虑柱承重影响的加权方式并非最佳；此外，考虑到内力重分布作用会导致破坏较重柱的竖向和水平荷载由其他柱分担，进而加重楼层损伤，未考虑损伤权重的加权方式也并不完善。因此，合理的加权方式应同时考虑重力荷载和损伤程度。试算表明，式(11)能较好地反映楼层损伤情况，故采用该加权系数。式中 W_{j}为第 j 根框架柱承受的竖向力，$D_{\mathrm{clp}j}$选取最大损伤方向的结果。

$$\lambda_{j}=\frac{\sqrt{D_{\mathrm{clp}j}}W_{j}}{\sum_{j=1}^{m}\sqrt{D_{\mathrm{clp}j}}W_{j}} \tag{11}$$

按上述方法用 Fortran 编制了基于平截面假定的纤维单元塑性铰截面双向滞回及 Diem 分析程序，如图 5 所示。

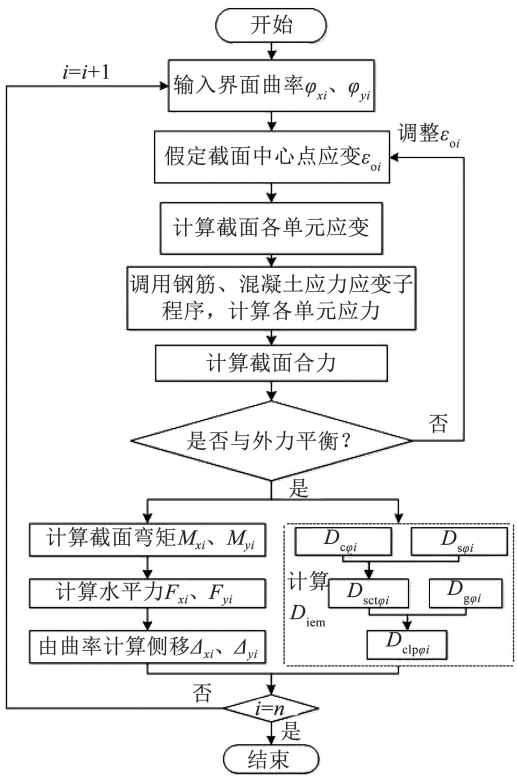


图 5 Diem 分析计算流程

Fig. 5 Diem analysis and calculation program

图 5 程序通过内力、外力平衡的迭代过程，可自动考虑柱轴力变化对截面各个单元应变、应力及损伤指数的影响，进而使得 Diem 具备了自动考虑轴力波动影响的功能。

3　结构建模及时程分析

3.1　鲁甸地震作用下典型结构建模分析

2014 年，云南鲁甸 6.5 级地震中龙头山镇一 RC 框架结构遭受严重破坏[19]，图 6 为该结构震后的总体外观（红色序号为有限元模型中的柱号），该结构大部分底层柱出现显著压弯破坏、剪切破坏或弯剪混合破坏，形成明显的薄弱层。图 7 为该结构底层平面布置和主要梁柱配筋。该结构混凝土设计强度等级为 C30，结构计算总高度为 11.3 m，其中，首层计算高度为 4.1 m，标准层高度为 3.6 m。距该建筑直线距离约 150 m 的龙头山强震台（53LLT）记录了该次地震的加速度时程，本研究即使用该记录作为最主要的地震动输入，其加速度时程及反应谱如图 8 所示。以下使用该结构作为对象对 Diem 楼层损伤模型进行分析。

先使用 Etabs 进行结构建模，再通过 ETO[20] 转化为 OpenSEES 代码，之后，在 OpenSEES 中调整材料本构等参数并输入地震动加速度记录进行有限元分析，最后，使用图 5 所示程序进行 Diem 损伤分析。

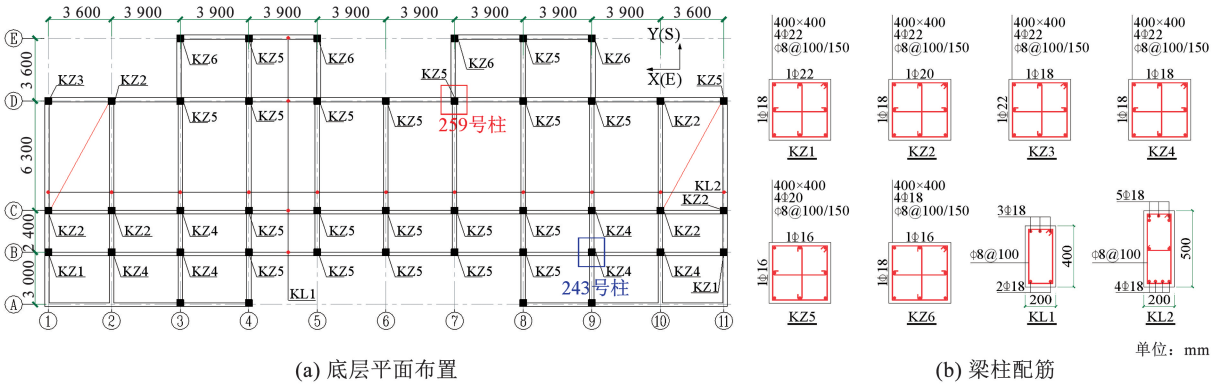


(a) 分析结构与强震台站位置关系　　(b) 震损外观

(c) 243号柱　　(d) 259号柱

图 6　鲁甸地震中某结构震害

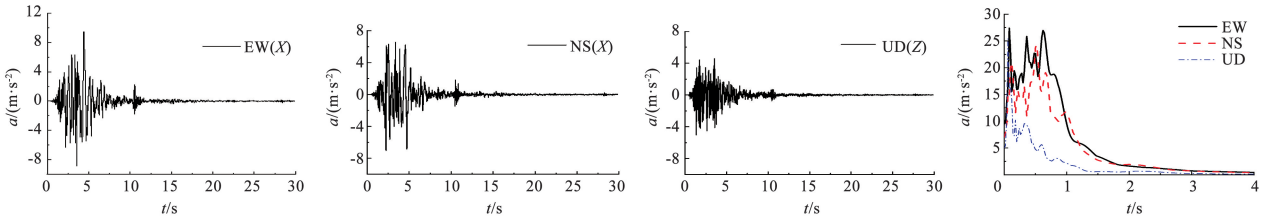
Fig. 6　Seismic damage of structure in Ludian earthquake



(a) 底层平面布置　　(b) 梁柱配筋

图 7　结构基本信息

Fig. 7　Basic information of structure



(a) 东西向加速度时程 (b) 南北向加速度时程 (c) 竖向加速度时程 (d) 加速度反应谱

图 8 龙头山台站加速度时程记录及 5% 阻尼比反应谱

Fig. 8 Acceleration time history records and 5% damping ratio response spectrum of Longtoushan Station

在 OpenSEES 分析[20]中梁柱单元的混凝土本构选用 Concrete02,钢筋本构模型采用 Steel02,梁柱单元选用基于柔度法的集中塑性铰单元 Beam With Hinges,其中,塑性铰区长度按式(12)[21]计算。砌体填充墙简化为等效对角斜撑模型,选用 truss 单元模拟,材料本构基于刘桂秋提出的应力应变关系模型[24],采用 Concrete01 进行模拟;无开洞填充墙的等效斜撑有效宽度采用 FEMA356 方法[5]计算;开洞填充墙的斜撑有效宽度按 Al-Chaar G 方法[25]进行折减。

$$L_p = 0.08L_0 + 0.022 f_y d_b \tag{12}$$

式中:L_0为柱端到跨中反弯点的距离,f_y和 d_b分别为柱纵向钢筋的屈服强度及直径。

考虑到梁和板在实际震害中没有损坏,因此,框架梁按弹性材料计算。详细分析条件见表 1 及表 2。

表 1 混凝土及砌体材料性能(平均值)

Tab. 1 Material properties of concrete and masonry (mean value)

单元类型	选取模型	f_0/(N·mm^{-2})	ε_0	f_u/(N·mm^{-2})	ε_u	f_t/(N·mm^{-2})
梁柱保护层	Concrete02	26.100	0.001 84	5.220 0	0.004 00	2.61
柱约束区	Concrete02	30.322	0.002 32	6.066 0	0.016 67	2.61
填充墙	Concrete01	3.330	0.002 74	1.098 9	0.006 85	

注:f_0为混凝土抗压强度,ε_0为峰值应变,f_u为混凝土残余强度,ε_u为残余强度对应的应变,f_t为混凝土抗拉强度。

表 2 钢筋材料性能(平均值)

Tab. 2 Material properties of steel bar (mean value)

单元类型	本构模型	d/mm	E_0/(N·mm^{-2})	f_y/(N·mm^{-2})	b
纵筋	Steel02	16 ~ 22	200 000	400	0.01
箍筋	Steel02	8	200 000	400	0.01

注:d 为钢筋直径,E_0为钢筋初始弹性模量,f_y为钢筋屈服强度,b为应变强化率。

由此形成结构有限元模型见图 9,对该结构进行非线性时程分析。图 10 展示了结构残余侧移与实际震害的对比。图 11 为鲁甸地震作用下结构底层位移。可以看出,底层 X、Y 向均出现明显残余变形,模拟得到的侧移方向与实际残余侧移趋势一致,初步验证了有限元模型的合理性,可作为后续框架柱损伤模型分析载体。

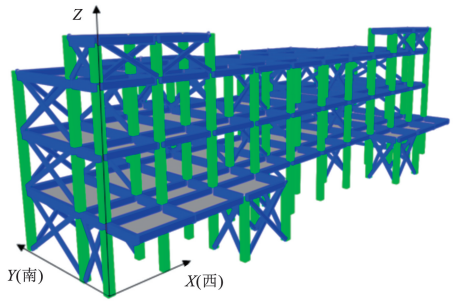
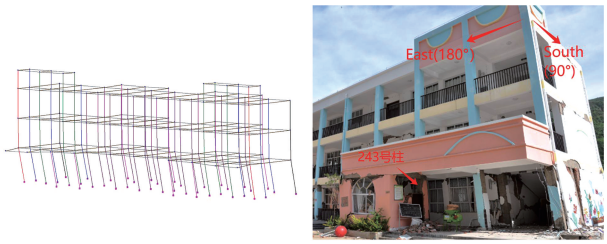


图 9 结构有限元模型

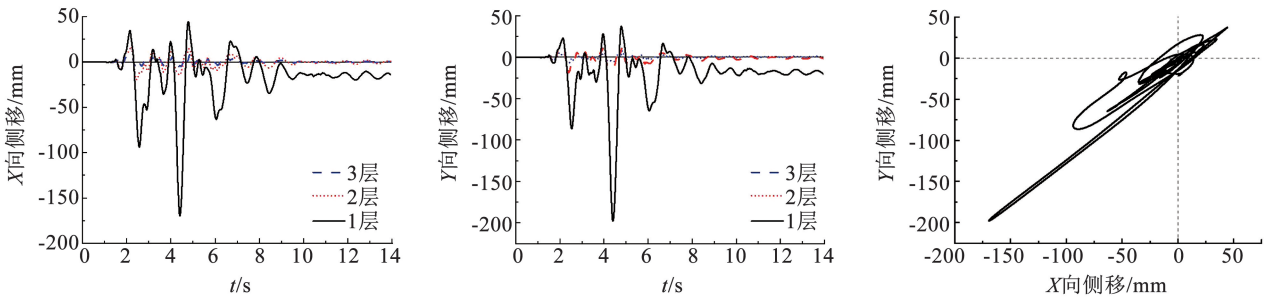
Fig. 9 Finite element model of structure



(a) 模拟结果 (b) 实际震害

图 10 框架变形与实际震害对比

Fig. 10 Comparison between frame deformation and actual seismic damage



(a) *X*向层间位移　(b) *Y*向层间位移　(c) *X*-*Y*底层层间位移

图 11　鲁甸地震作用下结构底层位移

Fig. 11　Bottom floor displacement of structure under action of Ludian earthquake

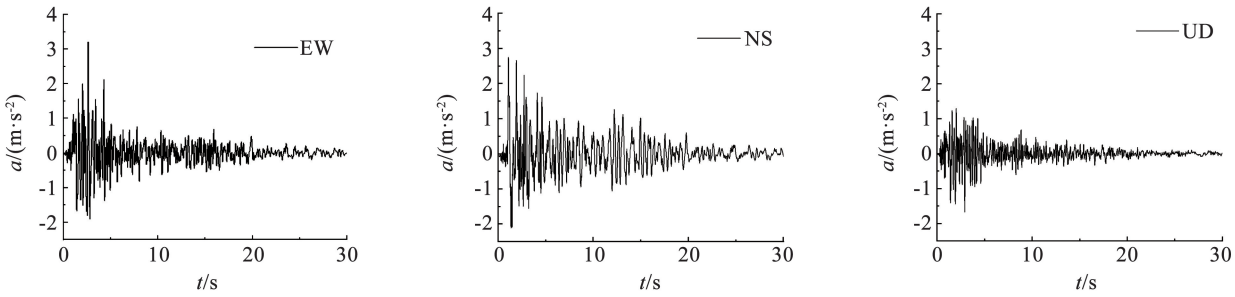
3.2　IDA 分析

之后对前述结构模型进行了非线性增量动力分析(IDA)。从 PEER 强震数据库中另选取了 6 条与Ⅱ类场地相似的强震记录，与前述龙头山地震动记录合并作为该结构三向地震动输入，如表 3 所示。图 12 给出了 E3 地震动的三向加速度时程曲线。图 13展示了所选 7 条地震动水平主方向(*X* 向)的加速度反应谱。

表 3　分析地震记录及参数

Tab. 3　Analysis of seismic records and parameters

编号	年份	地震名称	记录台站	震级	a_{PG}/(m·s^{-2},*X* 向)	R_{rup}/km
E1	2014	BTMZhaotong	53 Long TouShan Station	6.50	9.5	8.30
E2	1966	Parkfield	Cholame-Shandon Array #5	6.19	4.4	9.58
E3	1971	San Fernando	Castaic-Old Ridge Route	6.61	3.2	22.63
E4	1972	Managua_ Nicaragua-01	Managua_ESSO	6.24	3.7	4.06
E5	1992	Cape Mendocino	Petrolia	7.01	6.6	8.18
E6	1940	Imperial Valley-02	El Centro Array #9	6.95	2.8	6.09
E7	1995	Kobe_ Japan	Kobe University	6.90	3.1	0.92



(a) *X*向　(b) *Y*向　(c) *Z*向

图 12　E3 地震动加速度时程曲线

Fig. 12　Acceleration time history curves of E3 ground motion

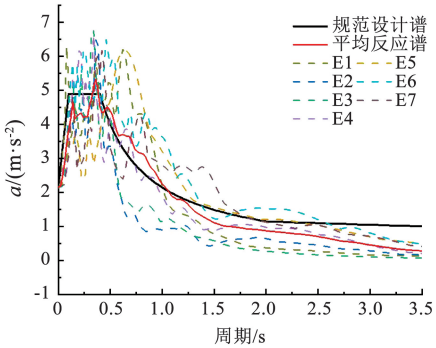


图 13　水平 *X* 向加速度反应谱

Fig. 13　Acceleration response spectrum in horizontal *X*-direction

对结构依次输入 7 个地震动，逐步调整峰值加速度(PGA，a_{PG})大小，从 0.05*g* 直至破坏(破坏判别采用层间位移角 1/25[5])，可得结构底层的 *X*，*Y* 方向位移和平面位移轨迹时程曲线。图 14 展示了各 PGA 作用下的层间位移角峰值曲线。图 15 展示了图 8 红色框选柱子(259 号柱)的底部塑性铰曲率和轴力时程曲线。可以看出，柱轴力经历了剧烈波动。上述分析结果构成了 Diem 损伤分析的基础数据。

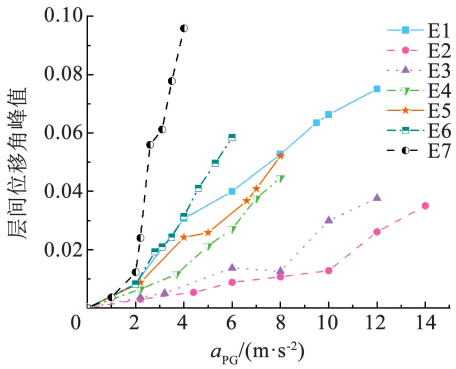


图 14 层间位移角峰值曲线

Fig. 14 Peak storey drift angle curves

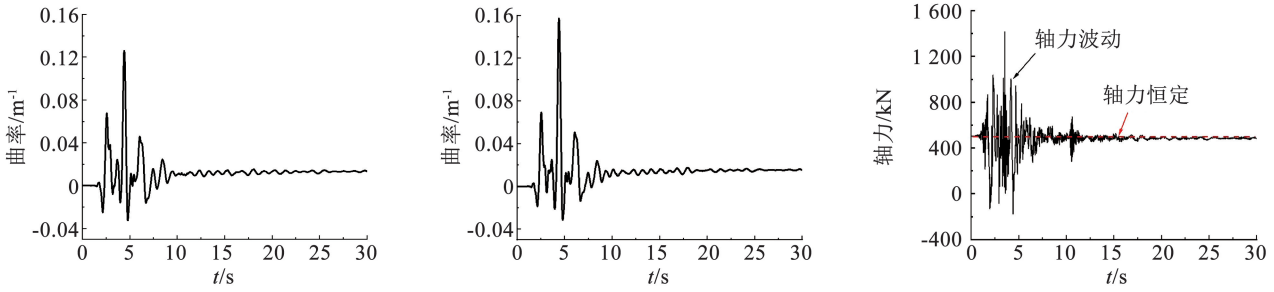
4 Diem 损伤分析

基于第 3 节 IDA 分析结果,提取每个工况底层所有柱的位移、轴力以及上下端塑性铰转角的时程数据,使用图 5 程序对所有底层柱以及整个底部楼层的 Diem 损伤指数进行计算。典型的损伤分析结果如下。

4.1 框架单柱损伤模型

以图 7(a)中圈出的 259 号柱和 243 号柱为例对单柱损伤指数结果进行分析。首先,利用图 5 程序按式(5)计算柱底和柱顶的塑性铰截面损伤指标 D_{sctb} 和 D_{sctt},随后,采用式(8)、(9)计算得到对应框架柱损伤指标 D_{clp}。图 16 为 3 个典型工况下该柱侧移方向上的损伤指标时程曲线。

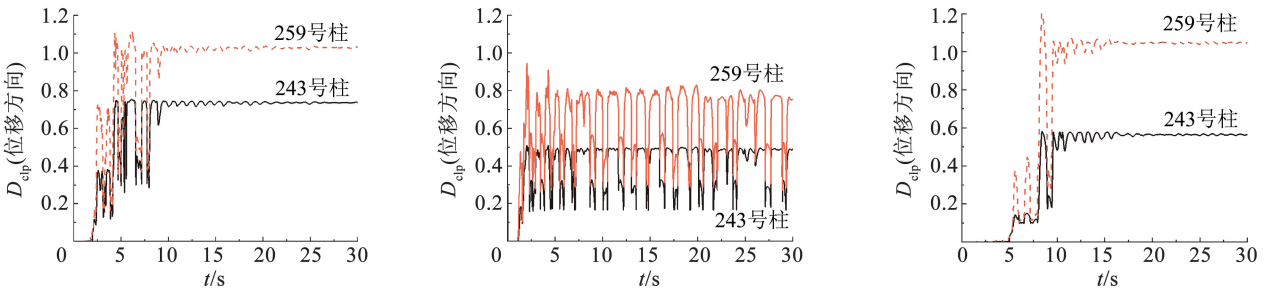
图 16(a)为鲁甸地震动记录分析结果。可以看出,震后 259 号柱倒塌损伤指数 $D_{clp}=1.14$,243 号柱 D_{clp} 则明显小于 1。对比图 6(c)和 6(d)可以看出,尽管二者均出现显著破坏,但 243 号柱的破坏以受拉开裂为主,未见显著混凝土压碎迹象,259 号柱则出现明显受压破坏。按照第 1 节对 $D_{clp}=1$ 的状态描述可知,由于受拉开裂后的混凝土在反向加载时仍能可靠承压,Diem 架构中着重考虑了混凝土受压损伤的影响,受拉开裂对塑性铰整体损伤的影响则相对较弱。据此可知,损伤分析结果与图 6 所示的实际震害程度基本相符。



(a) X向曲率 (b) Y向曲率 (c) 轴力

图 15 E1 原始地震动作用下 259 号柱柱底曲率及轴力时程

Fig. 15 Time history of curvatures and axial force at bottom of column No. 259 under action of E1 original ground motion



(a) E1地震动(a_{PG}=9.47 m/s^2) (b) E3地震动(a_{PG}=12 m/s^2) (c) E7地震动(a_{PG}=2.6 m/s^2)

图 16 柱 243 及柱 259 D_{clp} 时程

Fig. 16 D_{clp} time history of columns No. 243 and No. 259

4.2 框架楼层损伤模型

基于 IDA 分析得到所有底层柱的上下端塑性铰曲率、轴力时程以及楼层的位移时程,采用图 5 程序,基于式(10)、(11)可得到楼层损伤指标。图 17 展示了鲁甸地震动(E1,a_{PG} 为 9.47 m/s^2)作用下主侧移方向(45° ~ 225°)上 1 ~ 3 层的楼层损伤指标 D_{storey} 时程曲线。结合 $D_{storey}=1$ 的状态描述及图 6、10 可知,分析结果与实际震损程度基本相符。

使用该方法对所有地震动作用下的底层损伤指数 D_{storey} 进行分析,结果如图 18、19 所示。图 18 展示了楼层损伤指标(最大损伤方向)与地震动 a_{PG} 的关系,图 19 给出相应最大层间位移角的曲线对比。可以看出,楼层损伤指标 D_{storey} 和层间位移角在同一地震动下随 a_{PG} 增大的总体变化趋势一致(图 14),

局部有不同。如 E7、E6 地震动的曲线最“陡”，E2、E3 地震动的曲线最“平缓”，这验证了 D_{storey} 的合理性。

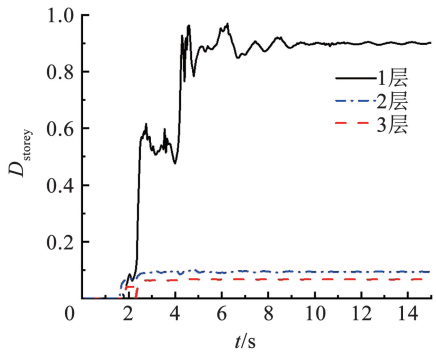


图 17　E1（a_{PG} = 9.47 m/s²）楼层损伤

Fig. 17　Storey damage under E1（a_{PG} = 9.47 m/s²）

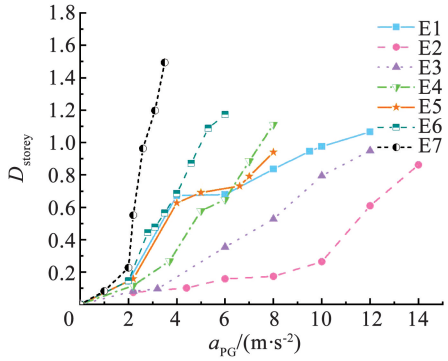


图 18　不同 a_{PG} 作用下楼层损伤 D_{storey}

Fig. 18　Storey damage D_{storey} under action of different a_{PG}

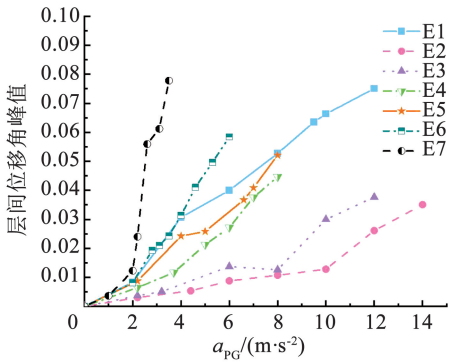


图 19　不同 a_{PG} 下层间位移角峰值

Fig. 19　Peak storey drift angle under different a_{PG}

上述损伤分析结果也表明，该结构发生了较为常见的薄弱层（底层）破坏，同时，结合单柱损伤指数结果可知，在截面尺寸和配筋相近条件下，底层柱的楼盖辖荷区越大，轴压比越高，其破坏程度越重。这也表明适当调整柱的截面尺寸和配筋，使薄弱层框架柱的轴压比相差不大，并适当减小整个楼层柱的平均轴压比，有助于减小结构震损程度，降低倒塌风险。

5　Diem 应用–损伤方向性分析

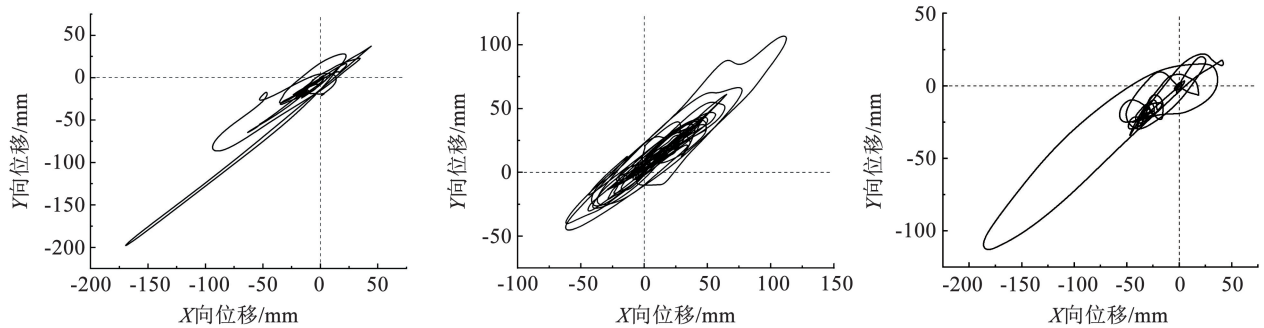
如前所述，区别损伤方向性是 Diem 模型的特性之一。以下采用前述 Diem 单柱和楼层损伤分析结果，用 Diem 模型定量分析结构在 7 个地震动作用下不同方向上的损伤差异。

柱损伤指数 D_{clp} 和楼层损伤指数 D_{storey}（式(5)～(10)）均包含了计算方向角（φ）这个变量。因此，同一时刻计算单柱及楼层在所有方向角上的 $D_{\text{clp}\varphi}$ 和 $D_{\text{storey}\varphi}$，即可考察结构和构件损伤在不同方向上的差异。

图 20 展示了 E1、E3 及 E7 地震动作用下框架底层的平面侧移轨迹。可以看出，侧移轨迹呈现一定随机性，不同地震动作用下轨迹存在显著差异。

分别选取上述地震动加载过程中的 4 个典型时刻，将式(8)～(10)的计算方向角（φ）由 0°变换至 360°，逐一计算对应方向的单柱及楼层损伤指数 D_{clp_φ} 和 $D_{\text{storey}\varphi}$，并将同一时刻的损伤指数计算结果在极坐标系中连成曲线，形成“损伤环”。图 21 展示了楼层损伤指数结果。单柱损伤环与楼层结果相近，限于篇幅未做展示。

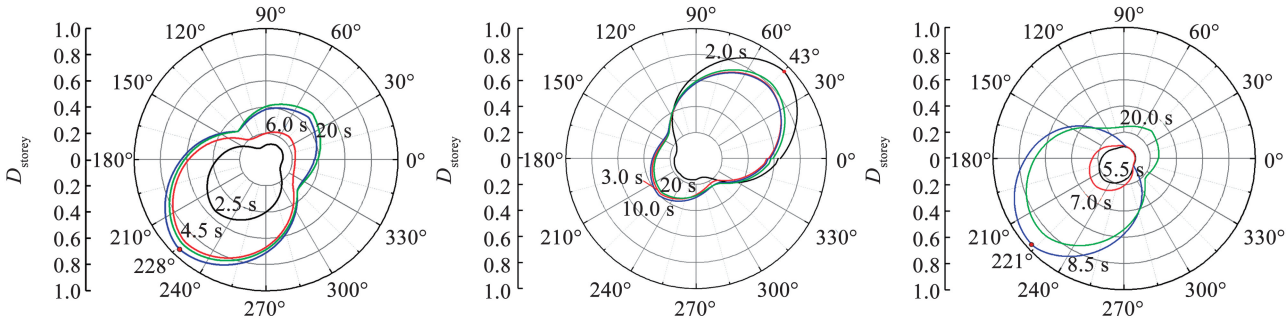
图 21 中楼层在 E1、E3、E7 地震作用下 4 个时刻的“损伤环”，其主方向均大致为 45°～225°，这与水平位移轨迹（图 20）和震害现象（图 6、10）一致。此外，对比图 20、21 可知，损伤主方向与最大位移方向存在较强的对应关系，但损伤环能更显著地展示主要损伤方向以及不同方向上损伤程度的发展过程。可见，Diem 能够更全面地描述结构在多维地震动作用下的损伤特性。



(a) E1地震动(a_{PG}=9.47 m/s²)　(b) E3地震动(a_{PG}=12 m/s²)　(c) E7地震动(a_{PG}=2.6 m/s²)

图 20　E1、E3、E7 地震动作用下底层水平位移轨迹

Fig. 20　Horizontal displacement trajectory of bottom floor under action of ground motions E1, E3, and E7



(a) E1地震动(a_{PG}=9.47 m/s²)　(b) E3地震动(a_{PG}=12 m/s²)　(c) E7地震动(a_{PG}=2.6 m/s²)

图 21　E1、E3、E7 地震动作用下底层“损伤环”

Fig. 21　"Damage ring" of bottom floor under action of ground motions of E1, E3, and E7

6　结　论

对基于材料的损伤评估模型 Diem 在 RC 框架结构的楼层损伤评估进行了研究,并以典型结构为例完成了模型验证,主要结论如下:

1)在已有 Diem 塑性铰截面损伤模型的基础上,分别采用损伤加权平均法和轴压 - 损伤混合加权法,构建了单柱损伤指标 D_{clp},以及考虑轴力影响的楼层损伤指标 D_{storey}。

2)以鲁甸地震中一栋震损的 RC 框架结构为对象,基于 OpenSEES 在 7 组三维地震动记录下开展 IDA 分析,并利用自编程序计算了 Diem 损伤指标。结果表明,Diem 能够清晰描绘结构地震损伤分布。与现场震害现象基本一致,验证了其合理性。

3)利用 Diem 损伤模型的方向差异性,计算单柱与楼层在 0° ~360°各向加载下的损伤指标,并在极坐标中以曲线相连,形成反映各方向损伤分布的“损伤环”。楼层位移轨迹及实测震害对比证明“损伤环”能够准确描述柱和楼层在各向发展过程中的损伤差异。

4)Diem 分析表明,该 RC 框架底层出现典型薄弱层破坏,且柱震损程度随轴压比增大而加剧。为降低倒塌风险,建议设计时应缩小各层柱轴压比差异,避免某一层柱受压过大;适当降低薄弱层柱的平均轴压比,从而减轻地震作用下的损伤集中。

综上,Diem 损伤模型无需依赖滞回曲线,能够在任意加载路径下对 RC 框架结构在水平双向或三维地震作用下的损伤进行精细化评估,并定量反映不同方向上的损伤差异,适用于三维地震动下 RC 框架结构的精细化损伤评估。

参考文献

[1] Lemnitzer A, Massone L M, Skolnik D A, et al. Aftershock response of RC buildings in Santiago, Chile, succeeding the magnitude 8. 8 Maule earthquake [J]. Engineering Structures, 2014, 76: 324. DOI:10. 1016/j. engstruct. 2014. 07. 003

[2] 董俊, 曾永平, 单德山. 高墩大跨铁路桥梁构件三维地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 141
Dong Jun, Zeng Yongping, Shan Deshan. Three-dimensional seismic vulnerability analysis of long-span railway bridge components with high pier [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 141. DOI:10. 11918/j. issn. 0367 - 6234. 201712079

[3] 潘毅, 任靖哲, 任宇, 等. 考虑台地效应的泸定 6. 8 级地震某框架结构震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 136
Pan Yi, Ren Jingzhe, Ren yu, et al. Seismic damage investigation and analysis of frame structures in Luding M_s6. 8 earthquake considering platform effect[J]. Journal of Civil Engineering, 2024, 57(6): 136. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 23050358

[4] 张昊宇, 曲博闻, 毛晨曦. 水平双向加载下钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 49
Zhang Haoyu, Qu Bowen, Mao Chenxi. Experimental investigation on seismic performance of reinforced concrete columns under biaxial cyclic loading[J]. Journal of Civil Engineering, 2019, 52(8): 49. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2019. 08. 004

[5] 康洪震, 江见鲸. 不同加载路径下钢筋混凝土框架柱抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 71
Kang Hongzhen, Jiang Jianjing. Experimental study on seismic behavior of RC frame columns under varied loading paths[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 71. DOI: 10. 3321/j. issn:1000 - 131X. 2003. 05. 012

[6] Technical report FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2000

[7] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]

[8] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733 - 9445(1985)111: 4(722)

[9] Qiu Fawei, Li Wenfeng, Pan Peng, et al. Experimental tests on RC columns under biaxial quasi-static loading [J]. Engineering Structure, 2002, 24: 419. DOI: 10. 1016/S0141 - 0296(01)00108 - 0

[10] Mergos P E, Kappos A J. A combined local damage index for seismic assessment of existing RC structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(6): 833. DOI:10.

1002/eqe.2247

[11]李忠献，陈宇，李宁. 基于材料损伤的钢筋混凝土构件损伤模型[J]. 工程力学，2014，31(6)：53
Li Zhongxian，Chen Yu，Li Ning. A damage model for reinforced concrete members based on material damage[J]. Engineering Mechanics，2014，31(6)：53. DOI：10.6052/j.issn.1000－4750.2013.05.0450

[12]Su Junsheng，Dhakal R P，Wang Junjie. Fiber-based damage analysis of reinforced concrete bridge piers[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering，2017，96：13. DOI：10.1016/j.soildyn.2017.01.029

[13]陈杰，张耀庭. 基于材料的钢筋混凝土构件的损伤模型研究[J]. 混凝土，2022，396(10)：23
Chen Jie，Zhang Yaoting. Research on damage model of RC member based on material[J]. Concrete，2022，396(10)：23. DOI:10.3969/j.issn.1002－3550.2022.10.005

[14]Zhang Haoyu，Mao Chenxi. Damage indices for RC columns under three-dimensional seismic action[C]// The 17th World Conference on Earthquake Engineering. Sendai：International Association for Earthquake Engineering，2021

[15]杜修力，欧进萍. 建筑结构地震破坏评估模型[J]. 世界地震工程，1991，(3)：52
Du Xiuli，Ou Jinping. Seismic damage assessment model for building structures[J]. World Earthquake Engineering，1991，(3)：52

[16]欧进萍，何政，吴斌，等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动，1999，19(1)：21
Ou Jinping，He Zheng，Wu Bin，et al. Seismic damage performance-based design of reinforced concrete structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，1999，19(1)：21

[17]Chang G A，Mander J B. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns：Part 1-Evaluation of seismic capacity[R]. Technical Report NCEER-94-0006，1994

[18]Rajesh P D，Koichi M. Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling[J]. Engineering Structures，2002，24：383. DOI：10.1016/S0141－0296(02)00080－9

[19]Grammatikou S，Biskinis D，Fardis M N. Ultimate strain criteria for RC members in monotonic or cyclic flexure[J]. Journal of Structural Engineering，2016，142(9)：04016046. DOI：10.1061/(ASCE)ST.1943－541X.000150

[20]潘毅，陈侠辉，王涵平，等. 无黏结预应力装配式框架结构地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2018，50(6)：71
Pan Yi，Chen Xiahui，Wang Hanping，et al. Seismic fragility analysis of unbonded post-tensioned fabricated RC frame structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2018，50(6)：71. DOI：10.11918/j.issn.0367－6234.201709017

[21]王初翀，魏智辉，陈侠辉，等. 机械铰的量化准则及其在倒塌分析中的应用[J]. 土木建筑与环境工程，2016，38(增刊2)：1
Wang Chuchong，Wei Zhihui，Chen Xiahui，et al. A quantitative criterion for mechanical hinge and its application on collapse analysis of reinforced concrete structures[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering，2016，38(S2)：1

[22]张昊宇，陈洪富，林旭川，等. 钢筋混凝土框架柱端剪切破坏震害分析及对策[J]. 哈尔滨工业大学学报，2016，48(12)：43
Zhang Haoyu，Chen Hongfu，Lin Xuchuan，et al. Mechanism analysis and prevention of seismic shear failure of RC frame columns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2016，48(12)：43. DOI：10.11918/j.issn.0367－6234.2016.12.005

[23]陈学伟. 结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2014：1
Chen Xuewei. Structural nonlinear analysis program OpenSEES theory and tutorial[M]. Beijing：Chian Architecture and Building Press，2014：1

[24]Paulay T，Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[M]. New York：Wiley，1992

[25]刘桂秋，颜友清，施楚贤. 砌体受压本构关系统一模型的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2009，36(11)：4
Liu Guiqiu，Yan Youqing，Shi Chuxian. Research on the unified model of the compressive constitutive relations of masonry[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2009，36(11)：4

[26]Al-Chaar G，Lamb G E，Abrams D P. Effect of openings on structural performance of unreinforced masonry infilled frames[J]. Publication of Crc Press Llc，2003，211：247

(编辑　刘　彤)