

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2025.01.009

基于多模态损伤模型的非对称混凝土结构 地震损伤评定

郭翔¹, 刘硕¹, 张延泰²

(1. 常州大学 城市建设学院, 江苏 常州 213164; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 为合理评估非对称混凝土结构的地震损伤, 研究基于多模态损伤模型, 根据三维非对称混凝土结构的模态特点, 提出了非对称混凝土结构的计算方法以及混凝土结构的整体损伤组合方法, 总结了非对称混凝土结构的损伤评定流程, 并通过 6 层框架剪力墙算例模型对地震损伤进行分析和评定。结果表明, 文中方法能够反映非对称混凝土结构的扭转损伤、各方向的平动损伤以及整体损伤状态。虽然地震动只作用在 y 方向上, 但是由于剪力墙的非对称布置使得混凝土结构存在刚度偏心, 在垂直地震动方向和扭转方向上都出现了响应和损伤, 且非对称混凝土结构的整体损伤主要由扭转损伤控制。扭转效应是造成非对称混凝土结构在地震作用下破坏的关键因素, 结构设计过程中一定要保证其抗扭性能。

关键词: 非对称结构; 多模态; 地震; 损伤模型; 扭转

中图分类号: TU 3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2025)01-0076-09

Seismic damage assessment of asymmetric reinforced concrete structures based on multi-mode damage model

GUO Xiang¹, LIU Shuo¹, ZHANG Yantai²

(1. School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To reasonably evaluate the seismic damage of asymmetric reinforced concrete structure, based on the multi-modal damage model and according to the modal characteristics of the three-dimensional asymmetric reinforced concrete structure, the damage index calculation method of the asymmetric reinforced concrete structure was put forward, as well as the overall damage combination method. Then the steps of asymmetric reinforced concrete structure damage evaluation are summed up. Using the example of the 6-story frame-shear wall structure, the damage of the reinforced concrete structure

收稿日期: 2024-06-02。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52108457)。

作者简介: 郭翔(1989—), 男, 湖北当阳人, 博士, 讲师。E-mail: guoxiang2131@cczu.edu.cn

引用本文: 郭翔, 刘硕, 张延泰. 基于多模态损伤模型的非对称混凝土结构地震损伤评定[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2025, 37(1): 76-84.

under earthquake is analyzed and evaluated by the proposed method. The results show that the proposed method can reflect the torsional damage, translational damage in all directions, and the overall damage state of the asymmetric reinforced concrete structure. Although the ground motion only acts in the y direction, the structure has a stiffness eccentricity due to the asymmetric arrangement of shear walls, and the asymmetric reinforced concrete structure has response and damage in both the vertical ground motion direction and the torsional direction. The overall damage of the asymmetric reinforced concrete structure is mainly controlled by the torsional damage. The torsional effect is the key factor that causes the failure of the asymmetric reinforced concrete structure in an earthquake. Thus, the torsional strength of the reinforced concrete structure has to be ensured in the structural design process.

Key words: asymmetric structure; multi-mode; earthquake; damage model; torsion

大量震害表明,扭转效应是造成混凝土结构在地震作用下被破坏的关键因素之一^[1-3]。混凝土建筑结构,特别是非对称混凝土结构极易发生明显的扭转损伤,最终导致混凝土结构被破坏。早在 20 世纪 30 年代,就有学者对地震作用下混凝土结构因偏心而发生的平扭耦联反应进行了研究^[4]。经过数十年的发展,扭转问题获得越来越多研究者的关注,研究方向从单层结构弹性扭转向非线性扭转效应转变^[5-7],后来又逐渐转向于对多层偏心结构抗震性能的研究^[8-10]。然而,即使是对称的建筑结构,在地震作用下进入非线性状态后各抗侧力构件非线性程度也有所不同。建筑结构之间的相互碰撞导致的不对称冲击^[11]、上部结构与地基接触面刚度分布不完全一致^[12]等原因,也可能引发结构扭转。

经过学者们的努力,扭转问题的研究取得了丰硕的成果,抗扭问题也逐渐被列入各国规范之中。目前各国规范采用的扭转控制指标主要有扭转位移比和相对偏心距。中华人民共和国住房和城乡建设部^[13]对扭转周期比进行了规定,但规范中的规定基本都是基于弹性分析方法,未必适用于混凝土结构非线性阶段的扭转控制。李英民等^[14]的研究表明,扭转周期比并未对结构的弹塑性扭转反应起到有效的控制作用。由于刚度偏心距不能很好地指示混凝土结构进入非线性状态后的扭转程度,SADEK 等^[15]研究了强度偏心距对单层偏心结构扭转效应的影响规律,认为混凝土结构进入非线性状态后,强度偏心距起控制作

用。除了强度偏心距,学者们还研究了其他参数来表示混凝土结构的扭转不规则性,如模态偏心率^[16]、有效模态质量比^[17]、刚性楼板转角^[18]等。

相较于扭转响应,对于扭转损伤量化及混凝土结构平扭损伤的演化规律等的研究相对较少。扭转相关的损伤研究,大多集中在对构件和混凝土结构的损伤检测等方面。BERNAGOZZI 等^[19]提出了一种基于模态柔度的损伤诊断方法。WANG 等^[20]对传统的非对称结构基于模态应变能的检测方法进行修正。而对于结构整体的扭转损伤量化,以往的研究往往通过一定方法避免对其进行直接评定。如 Park-Ang 损伤模型的三维拓展^[21],将损伤转换为构件的弯矩-曲率关系从而避开了混凝土结构整体扭转的问题,也可以将扭转损伤转换为对综合指标的折减^[22]。JEONG 等^[23]首次提出了真正意义上扭转效应的结构层次三维损伤指标。另外,结构的扭转损伤往往都是针对三维结构而言的,这就涉及到由局部损伤到整体损伤或由各个方向的损伤到结构整体损伤的组合问题。钢筋混凝土建筑的三维地震损伤评估是一个具有挑战性的问题,也是减灾和抗灾的关键问题^[24-25]。

研究从模态损伤模型入手,考虑三维非对称混凝土结构的特点,推导了混凝土结构两个平动方向以及扭转方向的损伤公式,并考虑了不同方向损伤之间的相关性,提出了混凝土结构整体损伤的组合方法。从结构层次对其包括扭转损伤在内的各方向损伤和结构整体损伤问题进行研究,

提出了基于多模态损伤模型的非对称混凝土结构地震损伤评定方法, 为非对称混凝土结构的损伤评定和结构设计提供了参考。

1 损伤模型

1.1 多模态损伤模型的三维改进

根据模态分解和地震后损伤混凝土结构在平衡位置可进行弹性微振动的特性, HE 等^[26]提出了多模态损伤模型, 损伤公式为:

$$D_n = 1 - \lambda_n \frac{Z_{n,ini}^2}{Z_{n,fin}^2} \quad (1)$$

$$D = \sqrt{1 - \prod_{n=1}^m (1 - D_n^2)} \quad (2)$$

式中: D_n 为结构的第 n 阶模态损伤指数; λ_n 为第 n 阶模态质量贡献因子, 简化计算时可取为 1.0; $Z_{n,ini}$ 为初始结构的第 n 阶周期; $Z_{n,fin}$ 为损伤后结构的第 n 阶周期; m 为考虑参与组合的模态数量, m 的取值可根据《建筑抗震设计标准》^[27]中振型参与质量达总质量 90% 所需的振型数取用; D 为结构的整体损伤指数。

该多模态损伤模型在推导过程中虽未明确指出仅适用于平面结构, 但是其推导的背景及应用都是平面结构。在考虑三维结构整体的扭转损伤时, 还需对该模型进行改进。

三维结构的每阶振型都可能包含两个平动方向以及扭转方向的分量。 n 层结构, 每层取 3 个自由度, 则结构的总自由度为 $N = 3n$, 结构的瞬时位移向量 \mathbf{u} 和第 i 阶振型向量 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 可以写为:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix}_{N \times 1} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_i = \begin{Bmatrix} \varphi_{xi} \\ \varphi_{yi} \\ \varphi_{\theta i} \end{Bmatrix}_{N \times 1} \quad (4)$$

$$\text{式中: } \boldsymbol{\varphi}_{xi} = \begin{Bmatrix} \varphi_{x1} \\ \vdots \\ \varphi_{xn} \end{Bmatrix}_{n \times 1}; \quad \boldsymbol{\varphi}_{yi} = \begin{Bmatrix} \varphi_{y1} \\ \vdots \\ \varphi_{yn} \end{Bmatrix}_{n \times 1};$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{\theta i} = \begin{Bmatrix} \eta_{i1} \\ \vdots \\ \eta_{in} \end{Bmatrix}_{n \times 1}。$$

从能量的角度进行考虑, 结构的动能 E_s 可以表示为

$$E_s = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{u}} = \frac{1}{2} \sum_i^n \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i Y_i \quad (5)$$

式中: $\dot{\mathbf{u}}$ 为结构振动的瞬时速度向量; \mathbf{K} 为结构的刚度矩阵; $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为结构的第 i 阶振型向量; \mathbf{M} 为结构的质量矩阵; Y_i 为广义坐标。

对于每个振型, 在式 (5) 中仅考虑 $\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i$, 设第 i 阶振型的动能 $E_i = \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i$, 则

$$E_i = \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i = \sum_j^n (m_{xj} \omega_{ij}^2 + m_{yj} v_{ij}^2 + J_j \eta_{ij}^2) \quad (6)$$

式中: ω_{ij} , v_{ij} , η_{ij} 分别为振型 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 中 j 层的 x 方向、 y 方向和扭转方向的分量; m_{xj} , m_{yj} 分别为第 j 层 x 方向、 y 方向的质量; J_j 为第 j 层的转动惯量。

在第 i 阶振型中, 可以从能量角度得到结构第 i 阶模态 x 方向、 y 方向和扭转方向的系数, 分别记为:

$$C_{xi} = \frac{\sum_j^n m_{xj} \omega_{ij}^2}{E_i} \quad (7)$$

$$C_{yi} = \frac{\sum_j^n m_{yj} v_{ij}^2}{E_i} \quad (8)$$

$$C_{\theta i} = \frac{\sum_j^n J_j \eta_{ij}^2}{E_i} \quad (9)$$

根据各阶模态方向系数 C_{xi} , C_{yi} 和 $C_{\theta i}$ 的大小, 可以对混凝土结构的各阶模态进行排序。得到初始混凝土结构和损伤后混凝土结构主震方向分别为 x 方向、 y 方向和扭转方向的模态参数排序, 见表 1。其中 $\boldsymbol{\varphi}_{xi}$, $\boldsymbol{\varphi}_{yi}$, $\boldsymbol{\varphi}_{\theta i}$ 分别为 x 方向、 y 方向和扭转方向的第 i 阶振型向量; $\boldsymbol{\varphi}'_{xi}$, $\boldsymbol{\varphi}'_{yi}$, $\boldsymbol{\varphi}'_{\theta i}$ 分别为 x 方向、 y 方向和扭转方向损伤后的第 i 阶振型向量; z_{xi} , z_{yi} , $z_{\theta i}$ 分别为 x 方向、 y 方向和扭转方向的第 i 阶振型周期; z'_{xi} , z'_{yi} , $z'_{\theta i}$ 分别为 x 方向、 y 方向和扭转方向损伤后的第 i 阶振型周期。

单独考虑各个主振方向的模态, 与平面结构实际上并没有较大区别, 相当于将三维结构通过

表 1 按主振方向进行排序后模态参数

Table 1 Mode parameters are sorted according to the direction of the main vibration

主振方向	第 1 阶	第 2 阶	...	第 n 阶
x 方向	$\varphi_{x1}, Z_{x1}; \varphi'_{x1}, Z'_{x1}$	$\varphi_{x2}, Z_{x2}; \varphi'_{x2}, Z'_{x2}$...	$\varphi_{xn}, Z_{xn}; \varphi'_{xn}, Z'_{xn}$
y 方向	$\varphi_{y1}, Z_{y1}; \varphi'_{y1}, Z'_{y1}$	$\varphi_{y2}, Z_{y2}; \varphi'_{y2}, Z'_{y2}$...	$\varphi_{yn}, Z_{yn}; \varphi'_{yn}, Z'_{yn}$
扭转方向	$\varphi_{\theta 1}, Z_{\theta 1}; \varphi'_{\theta 1}, Z'_{\theta 1}$	$\varphi_{\theta 2}, Z_{\theta 2}; \varphi'_{\theta 2}, Z'_{\theta 2}$...	$\varphi_{\theta n}, Z_{\theta n}; \varphi'_{\theta n}, Z'_{\theta n}$

模态分解变成了 3 个平面结构。因此, 3 个方向上 (x 方向、 y 方向、扭转方向) 的模态损伤可按照平面结构的方法进行计算, 所得的结果为:

$$d_n=1-\frac{Z_n^2}{Z_n'^2}, (r=x, y, \theta) \quad (10)$$
$$D_r=\sqrt{1-\prod_i^m(1-d_n^2)}, (r=x, y, \theta) \quad (11)$$

式中: d_n 为按主振方向重新排序后 x, y 与扭转方向的第 i 阶模态损伤指数; D_r 为混凝土结构整体在 x, y 与扭转方向的损伤指数, $0 \leq D_r \leq 1$; m 为各方向的组合阶数, 各方向根据各自情况可取不同值。

1.2 考虑扭转的混凝土结构整体损伤组合

从各振型包含的分量, 以及混凝土结构各个方向刚度之间的相关关系, 可以推断出混凝土结构各个方向上的损伤实际上是相关的, 即混凝土结构发生剪切损伤时或多或少都会伴随着弯曲损伤, 当其中一种损伤达到 1 时, 混凝土结构就会失效。借鉴 MERGOS 等^[28]组合混凝土结构弯曲损伤与剪切损伤得到混凝土结构整体损伤的方法, 可以对混凝土结构 x 方向、 y 方向及扭转方向的损伤进行组合, 得到混凝土结构整体损伤为

$$D=1-(1-D_x)^\alpha \cdot (1-D_y)^\beta \cdot (1-D_\theta)^\gamma \quad (12)$$

式中: α, β, γ 分别为指数相关的 x 方向、 y 方向和扭转方向结构损伤的重要性系数; D_x, D_y, D_θ 为混凝土结构在 x, y 与扭转方向的整体损伤指数。

整体损伤指数 D 的计算受 α, β, γ 值的影响很大。在对混凝土结构整体损伤进行物理意义解释的基础上, 可以确定这些参数的取值范围。

混凝土结构的整体损伤由 x 方向的损伤、 y 方向的损伤和扭转方向的损伤组合得到。根据损伤的定义, 混凝土结构的整体损伤指数 D 不应 > 1 。因此, 只有当 α, β, γ 的值 ≥ 1 时, 才能满足以上限制条件。此外, 假设混凝土结构中另外两个方向 (如 y 方向和扭转方向) 的损伤可以忽略不计, 则混凝土结构的整体损伤是由单方向 (如 x 方向) 的损伤控制的, 即 $D=1-(1-D_x)^\alpha \approx D_x$ 。而要满足该条件, α 的取值则需要接近 1。因此, 在实际计算时建议取 $\alpha=\beta=\gamma=1$, 则式 (12) 可转变为

$$D=1-\prod_{r=x,y,\theta}(1-D_r) \quad (13)$$

由式 (13) 可以看出, 只要 x, y 和扭转方向中任意一个方向上的整体损伤达到 1, 混凝土结构整体损伤就达到 1, 混凝土结构发生破坏。

1.3 非对称混凝土结构损伤的评定流程

非对称混凝土结构的损伤评定流程如图 1 所示

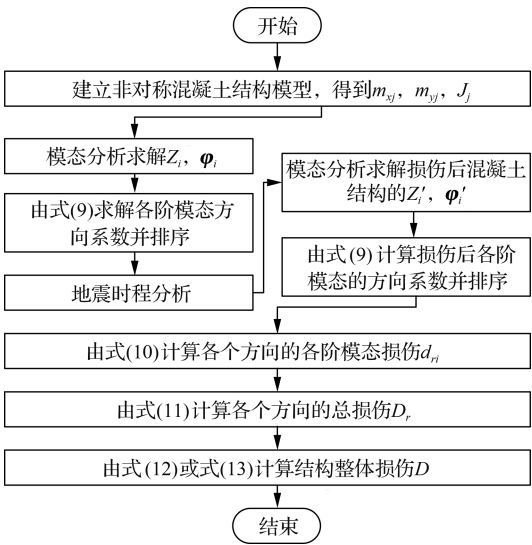


图 1 非对称混凝土结构损伤评定流程

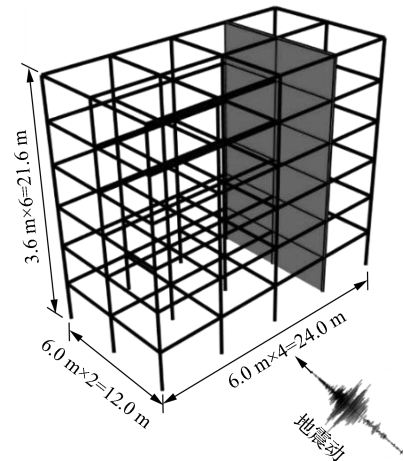
Fig.1 Flow chart of damage assessment for asymmetric structure

示, 该流程的关键在于确定损伤前后各主振方向模态的对应关系。由于三维混凝土结构的复杂性, 损伤后的混凝土结构的各阶模态与损伤前混凝土结构的各阶模态可能并不是简单的一一对应的关系, 需要对其进行具体分析。

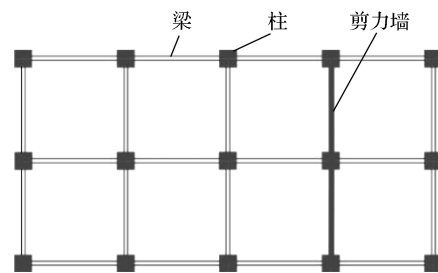
2 算 例

2.1 模型简介及地震动选取

算例模型为一偏心布置的 6 层框架-剪力墙混凝土结构, 结构模型及构件布置如图 2 所示。6 层框架-剪力墙混凝土结构各构件截面及配筋信息见表 2, 剪力墙沿高度方向截面不发生变化。增量动力 (IDA) 分析采用 OpenSees 程序进行。剪力墙采用 ShellMITC4 壳单元结合 LayeredShell 截面、PlaneStressUserMaterial 材料本构以及 PlateFromPlaneStress 材料本构的分层壳模型进行模拟。混凝土结构梁、柱采用基于位移的纤维梁柱单元 dispBeamColumn 结合 Concrete02 材料和 Steel4 材料进行模拟。选用最常用的 El Centro 地震动来进行 IDA 分析, 其时程曲线和反应谱如图 3 所示。



(a) 偏心框架-剪力墙模型



(b) 结构平面布置

图 2 非对称混凝土结构模型及构件布置

Fig.2 Asymmetric structure model and layout of components

表 2 6 层框架-剪力墙混凝土结构各构件截面及配筋信息

Table 2 Cross section and reinforcement details of 6-story wall-frame structure components

构件	截面长×宽/ (mm×mm)	纵筋		箍筋/横向钢筋	
		屈服强度/ MPa	布置位置	屈服强度/ MPa	布置位置
梁	300×600		6d25+6d25	235	d12@100
柱	500×500	335	16d25	235	d12@100
剪力墙	200×6 000		d10@150	335	d8@100

2.2 模态分析及对应关系

对初始结构进行模态分析, 所得的结构各阶模态特性见表 3。对表 3 中的各阶模态按照主振方向进行排序, 可以分别得到 x 方向, y 方向和扭转方向的第 1 到第 6 阶模态, 如 x 方向的 1 到 6 阶模态分别为混凝土结构的原第 1, 4, 7, 9,

12, 15 阶模态。同样地, 对于地震作用后出现损伤的混凝土结构也可以得到对应的 3 个主振方向的各阶模态。

需要注意的是, 由于混凝土结构在损伤后可能出现模态跃迁的现象, 所以损伤后混凝土结构的各阶模态并不一定与原结构一一对应, 即损伤后混凝土结构 x 方向的 1 到 6 阶模态并不一定为

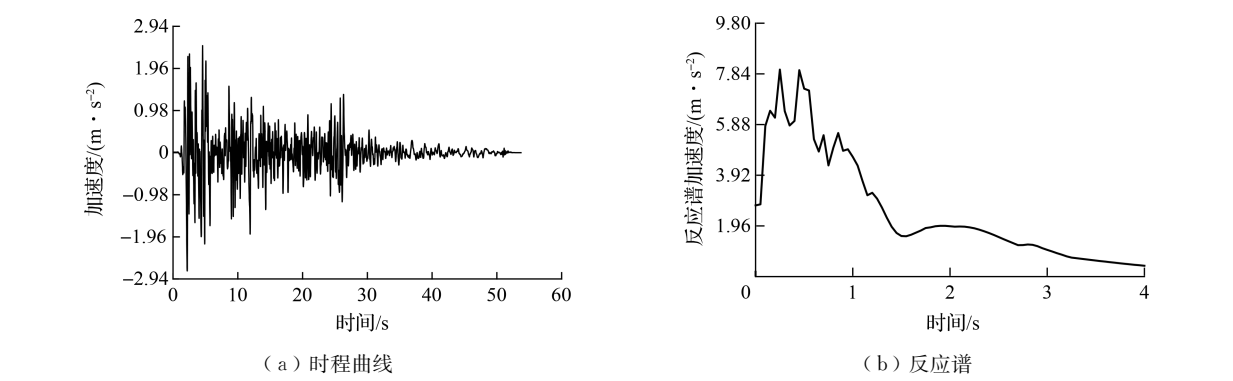


图 3 所选地震动的时程曲线及反应谱

Fig.3 Time history and response spectrum of the selected ground motion

表 3 混凝土结构各阶模态特性
Table 3 Modal characteristics of various orders of concrete structure

阶数	周期/s	方向系数			主振方向
		x 方向	y 方向	扭转方向	
1	0.600	1.00	0.00	0.00	x 方向
2	0.596	0.00	0.35	0.65	扭转方向
3	0.191	0.00	0.38	0.62	扭转方向
4	0.190	1.00	0.00	0.00	x 方向
5	0.179	0.00	0.61	0.39	y 方向
6	0.106	0.00	0.34	0.66	扭转方向
7	0.104	1.00	0.00	0.00	x 方向
8	0.071	0.00	0.34	0.66	扭转方向
9	0.066	1.00	0.00	0.00	x 方向
10	0.051	0.00	0.35	0.65	扭转方向
11	0.047	0.00	0.66	0.34	y 方向
12	0.043	1.00	0.00	0.00	x 方向
13	0.039	0.00	0.36	0.64	扭转方向
14	0.024	0.00	0.66	0.34	y 方向
15	0.024	1.00	0.00	0.00	x 方向
16	0.017	0.00	0.66	0.34	y 方向
17	0.013	0.00	0.65	0.35	y 方向
18	0.012	0.00	0.64	0.36	y 方向

表 4 损伤后混凝土结构的各阶模态特性
Table 4 Modal characteristics of the damaged concrete structure

阶数	周期/s	方向系数			主振方向
		x 方向	y 方向	扭转方向	
1	0.902	0.00	0.35	0.65	扭转方向
2	0.737	1.00	0.00	0.00	x 方向
3	0.261	0.00	0.35	0.65	扭转方向
4	0.229	0.00	0.64	0.35	y 方向
5	0.222	1.00	0.00	0.00	x 方向
6	0.140	0.00	0.34	0.66	扭转方向
7	0.119	1.00	0.00	0.00	x 方向
8	0.090	0.00	0.34	0.66	扭转方向
9	0.074	1.00	0.00	0.00	x 方向
10	0.064	0.00	0.35	0.65	扭转方向
11	0.051	0.00	0.66	0.34	y 方向
12	0.047	0.95	0.02	0.03	x 方向
13	0.047	0.05	0.34	0.61	扭转方向
14	0.025	0.00	0.66	0.34	y 方向
15	0.025	1.00	0.00	0.00	x 方向
16	0.017	0.00	0.66	0.34	y 方向
17	0.014	0.00	0.65	0.35	y 方向
18	0.012	0.00	0.64	0.36	y 方向

其第 1, 4, 7, 9, 12, 15 阶模态, 例如地震动峰值加速度为 4.90 m/s^2 时, 损伤后混凝土结构 x 方向的 1 到 6 阶模态就分别为其第 2, 5, 7, 9, 12, 15 阶模态, 见表 4。

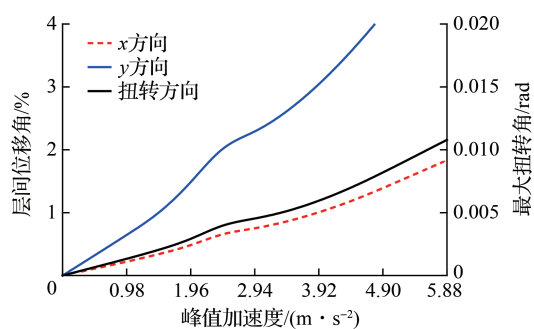
2.3 结果分析与讨论

图 4 为增量动力 (IDA) 分析过程中混凝土结构最大响应处以及几何中心处各个方向上的响应随地震峰值加速度 (PGA) 的变化曲线。由于地震动作用在 y 方向上, 故而混凝土结构在 y

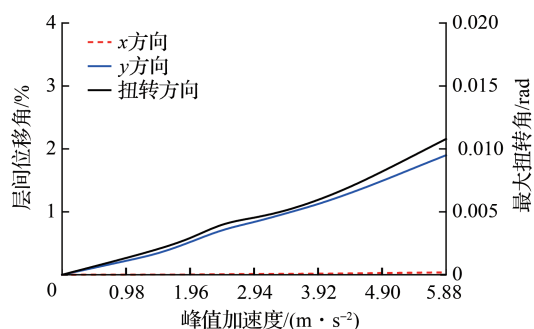
方向上的响应最大, 发展最为迅速。但是, 由于剪力墙的偏心布置, 使得混凝土结构在 x 方向上存在偏心, 混凝土结构在垂直于地震动方向和扭转方向上同样存在着变形, 其随地震峰值加速度的变化如图 4 所示。由图 4 可知, 混凝土结构在 x 方向和 y 方向上的响应在平面内分布并不均匀, 几何中心处的响应要远小于最大响应处的响应, 这是由于几何中心更靠近混凝土结构的扭转中心, 而最大响应会发生在距离扭转中心最远的位置。变形的不均匀分布致使混凝土结构远离扭转中心处的构件更容易破坏, 这一点也可以从混凝土构件的滞回曲线上看出。地震峰值加速度为 4.9 m/s^2 时, 混凝土结构远离剪力墙一侧的第一层角柱以及几何中心处的第一层中柱的弯矩-曲率曲线如图 5 所示, 从图 5 中可以看出角柱已经进入较大的非线性状态, 而中柱还处于弹性状态。此外, 由于刚性楼板假定, 楼层平面各处的转角都是相同的, 因此扭转方向上的响应在整个

混凝土结构平面上都是一样的, 故而图 4 (a) 和图 4 (b) 中的扭转响应完全相同。

混凝土结构各个方向的总损伤及混凝土结构的整体损伤随着峰值加速度 (PGA) 的变化情况如图 6 所示。对比混凝土结构响应及损伤发展可以看出, 研究提出的混凝土结构各个方向的损伤模型及整体损伤模型能够较为准确反映混凝土结构的损伤状态。由图 6 可知, 混凝土结构最先出现的是扭转损伤, 随后是 x 方向上的损伤, 剪力墙所在的 y 方向上的损伤最后出现, 但是当其损伤出现后便迅速发展, 最终超过 x 方向上的损伤, 主要原因是剪力墙的刚度较框架而言要大很多, 其破坏形式更接近于脆性破坏。由图 6 中混凝土结构各个方向上的损伤和整体损伤的变化情况可知, 混凝土结构的整体损伤由扭转损伤控制。当峰值加速度水平达到 5.88 m/s^2 时, 混凝土结构的整体损伤就已到达 0.99, 结构被破坏, 而此时的混凝土结构扭转损伤指数为 0.90, 远大于两



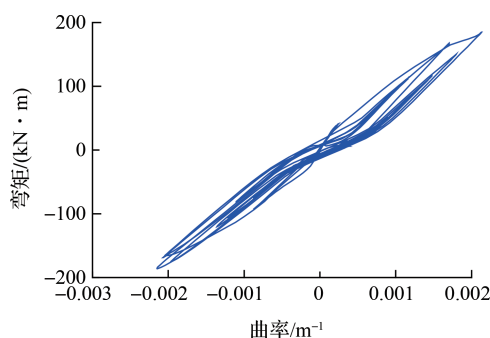
(a) 最大响应处



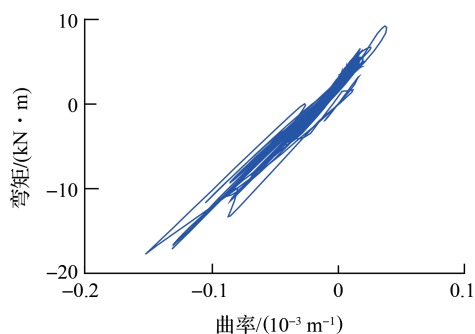
(b) 几何中心处

图 4 混凝土结构各方向上的响应随 PGA 的变化曲线

Fig.4 Response curve of concrete structure in all directions with PGA variation



(a) 角柱



(b) 中柱

图 5 第一层柱的弯矩-曲率曲线

Fig.5 Hysteresis curves of the corner column and center column of the first story

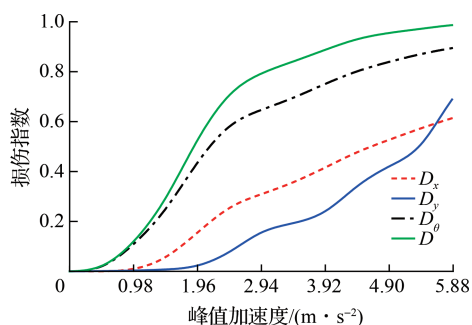


图 6 混凝土结构各方向的损伤及整体损伤指数

Fig.6 Damage in all directions and overall damage of concrete structure

个平动方向上的损伤。在峰值加速度从 0 m/s^2 增大至 5.88 m/s^2 的整个过程中,扭转损伤占主导地位。该现象再次验证了扭转效应是造成混凝土结构在地震作用下被破坏的关键因素,因此混凝土结构设计过程中一定要保证混凝土结构的抗扭性能。

3 结 论

1) 三维结构的每阶振型都可能包含两个平动方向以及扭转方向的分量,结合多模态损伤模型从能量角度对各阶主振方向进行排序,可推导出各个方向的各阶模态损伤和总损伤的计算公式,所得的损伤指数能够较为合理地反映非对称混凝土结构各个方向上的损伤情况。

2) 采用的混凝土结构整体损伤组合方法,能够在一定程度上考虑各个方向损伤之间的相关性,合理地反映非对称混凝土结构的整体损伤状态,总结损伤评定的流程,有助于非对称混凝土结构损伤评定工作的具体实施。

3) 对于非对称混凝土框架剪力墙结构,单方向作用的地震动会引起垂直地震动方向及扭转方向的响应和损伤,并且扭转损伤可能主导着非对称混凝土结构损伤的发展过程。再次证明了扭转效应是造成混凝土结构在地震作用下被破坏的关键因素,在混凝土结构设计中要尽可能避免扭转破坏模式的出现。

参考文献:

[1] SADEK A W, TSO W K. Strength eccentricity con-

cept for inelastic analysis of asymmetrical structures [J]. Engineering Structures, 1989, 11(3): 189-194.

[2] DUTTA S C. Effect of strength deterioration on inelastic seismic torsional behaviour of asymmetric RC buildings[J]. Building and Environment, 2001, 36(10): 1109-1118.

[3] 魏琰,王森,韦承基. 水平地震作用下不对称不规则结构抗扭设计方法研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(8): 12-17.

[4] AYRE R S. Interconnection of translational and torsional vibrations in buildings[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1938, 28(2): 89-130.

[5] KAN C L, CHOPRA A K. Torsional coupling and earthquake response of simple elastic and inelastic systems[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(8): 1569-1588.

[6] BOZORGNIA Y, TSO W K. Inelastic earthquake response of asymmetric structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(2): 383-400.

[7] GOEL R K, CHOPRA A K. Inelastic seismic response of one-storey, asymmetric-plan systems: effects of system parameters and yielding[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1991, 20(3): 201-222.

[8] FAJFAR P, KILAR V, MARUSIC D, et al. The extension of the N2 method to asymmetric buildings [C]//The 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures. Thessaloniki: EWSBICS, 2005: 291-308.

[9] MOGHADAM A S, TSO W K. Pushover analysis for asymmetric and set-back multi-story buildings [C]//The 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: WCEE, 2000: 1093.

[10] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(8): 903-927.

[11] KARAYANNIS C G, NAOUM M C. Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction [J]. Engineering Structures, 2018, 163: 93-111.

[12] 卢俊龙,侯莉娜,张荫. 多维地震激励下地基与结构相互作用系统动力反应耦联分析[J]. 应用力学

- 学报, 2021, 38(2): 506-514.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [14] 李英民, 韩军, 刘建伟. 建筑结构抗震设计扭转周期比控制指标研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 77-85.
- [15] SADEK A W, TSO W K. Strength eccentricity concept for inelastic analysis of asymmetrical structures [J]. Engineering Structures, 1989, 11 (3): 189-194.
- [16] GEORGOUSSIS G K. Modal eccentricities of asymmetric structures[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2006, 15(3): 339-361.
- [17] ÖZHENDEKCI N, POLAT Z. Torsional irregularity of buildings [C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: WCEE, 2008: 1217.
- [18] ÖZMEN G, GIRGIN K, DURGUN Y. Torsional irregularity in multi-story structures[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE), 2014, 6(4): 121-131.
- [19] BERNAGOZZI G, VENTURA C E, ALLAHDIAN S, et al. Output-only damage diagnosis for plan-symmetric buildings with asymmetric damage using modal flexibility-based deflections[J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110015.
- [20] WANG Y, THAMBIRATNAM D P, CHAN T H T, et al. Method development of damage detection in asymmetric buildings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 413: 41-56.
- [21] GUO J, WANG J J, LI Y, et al. Three dimensional extension for park and ang damage model[J]. Structures, 2016, 7: 184-194.
- [22] JEONG S H, ELNASHAI A S. Analytical and experimental seismic assessment of irregular RC buildings [C]//The 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: WCEE, 2004: 113.
- [23] JEONG S H, ELNASHAI A S. New three-dimensional damage index for RC buildings with planar irregularities[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(9): 1482-1490.
- [24] MAKHLOOF D A, IBRAHIM A R, REN X D. Damage assessment of reinforced concrete structures through damage indices: a state-of-the-art review [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2021, 128(3): 849-874.
- [25] BHATTA S, DANG J. Seismic damage prediction of RC buildings using machine learning[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2023, 52(11): 3504-3527.
- [26] HE Z, GUO X, ZHANG Y T, et al. Global seismic damage model of RC structures based on structural modal properties[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(10): 04018171.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [28] MERGOS P E, KAPPOS A J. Seismic damage analysis including inelastic shear-flexure interaction[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2010, 8(1): 27-35.

(责任编辑:周安迪)