

采用动力响应推演及耗能差率的震损结构损伤演变快速评估

程时涛, 何浩祥, 陈易飞

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 准确且切实可行的损伤评估方法可对震损结构的损伤程度进行量化, 并为结构修复加固提供有效指导。针对实际工程条件以及已有损伤评估或识别方法在精度和可行性方面的不足, 在传统弹塑性耗能差损伤评估方法上提出通过剪力比值消除质量影响的广义损伤评估方法, 仅以地震信号和结构动力响应即可实现对结构损伤的动态评估。在此基础上, 提出用前震信号和 Kalman 滤波识别技术推演结构理想弹性响应, 并利用主震信号实现结构整体和楼层损伤快速评估的方法。以钢混框架结构为例进行验证, 结果表明: 所提出的震损结构整体及层间损伤评估方法能够准确反映结构损伤的动态演变过程以及薄弱层的分布。与传统弹塑性耗能差方法以及基于频率变化率的损伤评估方法对比, 所提方法具有良好的工程实用性, 可为实际震损结构损伤快速评定提供有效支持。

关键词: 损伤评估; 震损结构; Kalman 滤波; 整体损伤; 层间损伤

中图分类号: TU312⁺.3; TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0020-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.003

引 言

在中震和大震下, 建筑结构的正常使用功能和整体性能将明显下降, 严重时会造成大量人员伤亡和重大经济财产损失^[1]。在震后, 为最大限度降低经济损失、保障抗震救灾顺利进行并快速恢复结构功能, 通常会采取有效的维修加固措施对震损结构进行修复^[2]。为确保震损结构修复加固方案的精准、迅速和有效, 需要根据损伤识别或评估方法准确量化震损结构的损伤程度和位置, 从而为救援抢修提供明确指导, 其相关研究工作具有重要的理论价值和工程意义。

目前震损结构的损伤分析方法的研究和应用主要从损伤评估^[3-4]和损伤识别^[5-6]两个角度来开展。结构地震损伤评估利用损伤指标对遭受地震作用的结构构件、楼层和整体进行综合量化分析, 以便为区域震害评估提供基础数据。常用的震损结构损伤评估方法包括: 基于最大位移(角)、残余位移、频率、裂缝宽度等响应指标的损伤评估方法; 基于能量的损伤评估方法, 如 Park-Ang 模型^[7]和 Kratzig 模型^[8]等; 基于专家经验的损伤评估方法。目前大部分传统损伤评估方法所用损伤指标在有限元分析和试验中容易被测试和获取, 但对于实际震损结构, 如果在地震前没有布置传感器, 是

难以获取或计算的。此外, 应用传统损伤评估方法开展损伤评估效能较低, 无法满足震后损伤快速评估、修复和恢复功能的需求。例如, 最常用的 Park-Ang 模型是根据累计滞回耗能和变形综合评估结构或构件的损伤程度, 虽然在构件拟静力试验研究中得到普遍应用, 但其存在难以监测、阈值不严格、无法准确表征损伤演变过程等不足。尽管研究者提出了不同的修正模型, 但仍无法彻底解决上述不足^[9-10]。

近年来, 从结构健康监测理念发展而来的结构损伤识别为解决上述问题提供了新的思路 and 手段。在损伤识别方法中, 广义的结构损伤识别被定义为对与结构力学性能相关的静、动力特征发生改变进行定性和定量的判断。结构地震损伤识别则是根据实时或准实时监测数据追踪地震过程中结构动力性能和动态特征参数的变化, 发现结构的损伤位置和程度, 以评估地震过程中结构的损伤状态。目前损伤识别方法主要包括: 基于模态特征的方法, 如模态频率、模态振型、模态阻尼、模态应变能以及模态柔度等与模态信息相关的损伤识别方法; 基于频响函数的方法; 基于现代信号分析的方法, 如 HHT、小波包变换等; 基于物理参数识别的方法, 如 Kalman 滤波和粒子滤波等; 基于模型修正的识别方法; 基于智能算法的识别方法, 如模糊理论、遗传算法和神经网络等^[11]。损伤识别是结构健康监测的关键技术, 但

收稿日期: 2021-04-11; 修订日期: 2021-07-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500604); 国家自然科学基金资助项目(51878017)。

限于工程成本通常仅在大型工程结构中得到应用。如何发展精度高且成本低的损伤识别技术,并使之能够在地震风险较高地区的结构群体中广泛应用是亟需解决的问题。

综上,损伤评估和损伤识别既有联系又有区别,前者注重损伤指标的实用性和结构整体评定效果、工程价值及社会影响,后者强调采用多种监测手段和识别算法对结构性能进行精准实时评定,二者的优势互补和协同发展是保障震损结构损伤分析研究不断发展的基石。

近年来,研究者提出了基于新型指标的震损评估方法,例如文[12]提出了基于弹塑性耗能差的损伤评估方法,认为结构的损伤程度可以由实际弹塑性状态(损伤状态)下的累积变形能与理想弹性状态(完好状态)下的累积变形能之差率表示。理论分析和试验验证表明:基于弹塑性耗能差的损伤评估方法机理明确、阈值严格,可以为静动力试验、动力时程分析及易损性分析等提供有效支持,同时能够反映损伤的动态演变过程。然而,与其他基于能量的损伤评估方法(如Park-Ang模型等)类似,基于弹塑性耗能差的损伤评估方法仍需以地震作用下结构的剪力时程和位移时程作为基本数据。虽然地震中实际结构的位移响应可以由传感器测得,但囿于当前测试技术水平,仍难以直接测得剪力时程。此外,基于弹塑性耗能差的损伤评估方法需预测结构在同一激励且始终处于理想弹性状态下的响应,这也比较难实现。因此,上述方法的局限性要求基于弹塑性耗能差的损伤评估方法的实用性进一步提升。

损伤识别研究中基于物理参数识别的方法为解决上述问题提供了技术支持。以Kalman滤波为代表的物理参数识别方法能够根据部分实测响应信号、状态方程及观测方程对与结构损伤状态相关的未知物理量参数(如刚度、阻尼和动力响应等)进行识别^[13-15]。在相关理论研究方面,吴新亚等^[16]提出了基于自适应Kalman滤波的剪切线性模型刚度及阻尼识别方法,Lei等^[17]提出了基于Kalman滤波的两阶段结构参数估计方法,对于简单结构取得了良好的识别效果。目前的物理参数识别方法对信息不完备下的非线性复杂结构的损伤识别能力有限,为了解决上述问题,研究者提出了多种考虑信息不完备的方法^[18]、子结构识别方法^[19]以及非线性参数识别方法^[20],然而这些方法一般假设结构的部分或全部质量已知而部分楼层的动力响应是未知的,但实际结构的各层质量和整体质量数值都是难以获得的,而获取所有楼层动力响应的难度却相对并不大。因此,传统的信息不完备条件和部分假设与真实条件存在差距,导致相关识别方法的可行性较差。此

外,基于非线性模型的损伤识别通常需要对给定函数的恢复力模型参数进行识别,理论模型与实际非线性特征存在的误差使实际震损结构的损伤识别精度并不理想。由此可见,根据Kalman滤波并结合损伤评估方法,提出一种不需要识别质量和剪力,而仅依赖少数传感器便可对结构损伤进行精准量化的方法具有重要意义。

针对目前实际震损结构损伤分析研究存在的问题和不足,本文在弹塑性耗能差方法的基础上提出广义弹塑性耗能差损伤评估模型,规避了实际结构基底剪力和楼层剪力无法直接测量的问题。针对实际结构在理想弹性状态下的地震响应难以获知的局限,提出基于Kalman滤波的理想弹性响应预测方法。在此基础上,提出基于广义弹塑性耗能差的震损结构整体及层间损伤评估方法,可根据结构的加速度及位移响应直接量化损伤程度和演变过程,具有良好的实用性和准确性。

1 广义弹塑性耗能差损伤评估模型

对于如图1所示的承受荷载的结构,假设其在力 F_y 作用下屈服,其屈服位移为 u_y 。当进入塑性阶段后结构将发生损伤,产生弹塑性位移 u_m 所需的力为 F_m ,累积弹塑性变形能为四边形OBCD的面积 S_{OBCD} 。假定结构不发生损伤,则其将始终处于理想弹性状态,此时产生位移 u_m 所需的力为 F_e ,其弹性变形能为三角形OAD的面积 S_{OAD} 。随着荷载的增长, u_m 也随之增长,结构损伤逐渐加剧,而两种变形能的差值即三角形面积 S_{ABC} 也不断增大,根据损伤与耗能之间的联系,可认为结构的损伤程度可以用弹性和塑性的耗能差(简称为弹塑性耗能差)来量化表征。

在单调荷载作用下,基于弹塑性耗能差的损伤计算公式如下:

$$D_E = \frac{S_{ABC}}{S_{OAD}} = \frac{S_{OAD} - S_{OBCD}}{S_{OAD}} = 1 - \frac{F_y u_y + (F_y + F_m)(u_m - u_y)}{F_e u_m} \quad (1)$$

在动力作用下,基于弹塑性耗能差的结构损伤计算公式如下:

$$D_E(t) = \frac{E_E(t) - E_F(t)}{E_E(t)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t |F_{Fi} \Delta u_{Fi}|}{\sum_{i=1}^t |F_{Ei} \Delta u_{Ei}|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t |F_{Fi} \Delta u_{Fi}|}{\beta^2 \sum_{i=1}^t |F_{Ri} \Delta u_{Ri}|} \quad (2)$$

式中 $D_E(t)$ 表示 t 时刻结构的损伤指数; $E_E(t)$ 和 $E_F(t)$ 分别表示 t 时刻结构在理想弹性状态下和实际弹塑性状态下的累计变形能; F_{Fi} 和 Δu_{Fi} 分别表示 i 时刻结构在实际弹塑性状态下的基底剪力及顶部位移增量; F_{Ei} 和 Δu_{Ei} 分别表示 i 时刻结构在理想弹性状态下的基底剪力及顶部位移增量; F_{Ri} 和 Δu_{Ri} 分别表示 i 时刻结构在真实弹性状态下的基底剪力和顶部位移增量; β 表示将真实弹性状态下的响应放大至与实际弹塑性状态相同的系数。

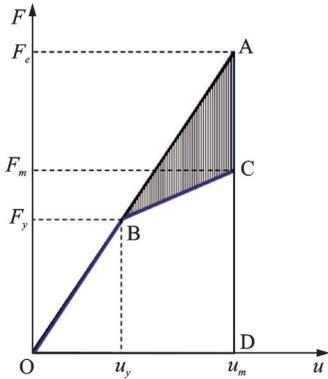


图 1 结构或构件的变形能示意图

Fig. 1 Diagram of deformation energy of structure or member

由于无法直接测得地震下实际结构的剪力值及质量,既有基于弹塑性耗能差的损伤评估方法及目前众多与力或者能量相关的损伤评估方法在实际工程应用中受到限制。此外,该方法还要解决如何推演或预测实际结构在理想弹性状态下响应的问题。因此,为了实现该方法的实用化,亟需提出有效的改进方法。

根据结构动力学理论,单自由度结构在地震下的基底剪力时程为其质量与结构绝对加速度响应的乘积。通过分析式(2)的形式可发现,其分数项的分子和分母均有剪力项,若将结构简化为单自由度结构,式(2)可自动消除结构质量的影响,只保留了加

速度响应和位移增量的乘积效应,二者完全可以通过加速度传感器及信号频域积分算法获取。对于复杂多自由度结构,在评估结构的整体损伤程度时,可将结构整体等效视为单自由度结构。因此可以采用类似的处理方法,近似地直接消除质量项的影响,使基于弹塑性耗能差的损伤评估方法具备充分的工程可行性。基于该思路,本文提出广义弹塑性耗能差损伤评估模型,其计算公式如下:

$$D_E(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l |F_{Fi} \Delta u_{Fi}|}{\sum_{i=1}^l |F_{Ei} \Delta u_{Ei}|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l |m \ddot{u}_{Fi} \Delta u_{Fi}|}{\sum_{i=1}^l |m \ddot{u}_{Ei} \Delta u_{Ei}|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l |\ddot{u}_{Fi} \Delta u_{Fi}|}{\sum_{i=1}^l |\ddot{u}_{Ei} \Delta u_{Ei}|} \quad (3)$$

式中 m 表示结构或构件的质量, \ddot{u}_{Fi} 表示 i 时刻结构或构件在弹塑性状态下的加速度响应, \ddot{u}_{Ei} 表示 i 时刻结构或构件在理想弹性状态下的加速度响应。

由式(3)可以看出,广义弹塑性耗能差损伤评估模型仅通过加速度以及位移响应即可评估结构或构件的损伤程度,深刻反映了结构由于损伤导致的能量变化内涵,摆脱了诸多损伤评估模型或方法需要提前测得剪力或质量等物理量信息的桎梏,具有较高的工程意义。根据测得的正常运营状态(理想弹性状态)以及损伤状态(弹塑性状态)下的加速度和位移信号,结合广义弹塑性耗能差损伤评价模型,能够量化结构震损程度。虽然上述方法只能近似消除复杂多自由度结构的质量项,其计算值与真实值之间存在一定偏差,但其计算值仍具有较高的有效性和准确性;另外,也可将上述方法推演到层间损伤计算,从而实现结构损伤更加全面的评价。通过借鉴已有成果并经综合分析^[12,21],本文提出了结构损伤状态与损伤指数的对应关系,如表 1 所示。

表 1 不同损伤等级对应的损伤指标范围

Tab. 1 Damage index range of different earthquake damage level

损伤程度	损伤现象描述	损伤指数
轻微损伤	少数承重构件有微小残余变形,个别非结构构件破坏明显,非结构构件发生不同程度破坏	0~0.25
中等破坏	多数承重构件有轻微残余变形,部分承重构件有明显残余变形,个别非结构构件严重破坏	0.25~0.55
严重破坏	多数承重构件严重破坏或部分倒塌	0.55~0.80
倒塌	多数承重构件倒塌	0.80~1.00

对于实际震损结构,仅能测得地震下的弹塑性响应,不能直接获取结构在同一地震作用下且始终处于理想弹性状态时的响应,为此还需提出切实可行的预测方法。由于主震发生前通常会发生振幅较小的前震,而此时结构一般处于弹性状态,因此可以

利用相关前震信号和结构响应监测信号进行等效多自由度结构的物理参数识别,进而建立相关动力学模型。在获取主震下的激励和结构响应信号后,用该弹性模型快速推演出针对主震的结构理想弹塑性响应,从而解决上述问题。具体的物理参数识别方

法可以基于 Kalman 滤波方法开展,下文将进行深入研究。

2 基于 Kalman 滤波及广义弹塑性耗能差率的结构损伤评估方法

2.1 基于 Kalman 滤波的结构等效模型

为了克服传统物理参数识别方法在不完备信息条件下多自由度结构识别能力不足的局限,基于 Kalman 滤波原理,本文认为可根据结构在前震下的响应对结构等效刚度及等效质量进行识别,建立结构等效模型,进而实现主震下的结构响应推演。与传统思路不同,本方法不严格要求等效模型与实际结构的质量、刚度相一致,只要求确保在响应层面能够与实际结构在前震下的响应相吻合,从而能够利用等效模型计算实际结构在理想弹性状态下的响应。对于实际的多自由度结构,可用串联层间模型来表征,其动力方程为:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -F(t) = -M\ddot{u}_g \quad (4)$$

式中 u, \dot{u} 和 \ddot{u} 分别表示结构的位移、速度和加速度; M, C 和 K 分别表示结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; F 表示外荷载向量; I 表示单位对角矩阵; \ddot{u}_g 表示动力荷载加速度。

$$\begin{cases} \dot{u}_{1,0} = u_{4,0} \\ \dot{u}_{2,0} = u_{5,0} \\ \dot{u}_{3,0} = u_{6,0} \\ \dot{u}_{4,0} = -\ddot{u}_g - [c_{1,1}u_{4,0} + c_{1,2}u_{5,0} + (u_7 + u_8)u_{1,0} - u_8u_{2,0}] / u_{10} \\ \dot{u}_{5,0} = -\ddot{u}_g - [c_{2,1}u_{4,0} + c_{2,2}u_{5,0} + c_{2,3}u_{6,0} - u_8u_{1,0} + (u_8 + u_9)u_{2,0} - u_9u_{3,0}] / u_{11} \\ \dot{u}_{6,0} = -\ddot{u}_g - (c_{3,2}u_{5,0} + c_{3,3}u_{6,0} - u_9u_{2,0} + u_9u_{3,0}) / u_{12} \\ \dot{u}_7 = \dot{u}_8 = \dot{u}_9 = 0 \\ \dot{u}_{10} = \dot{u}_{11} = \dot{u}_{12} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $c_{i,j}$ 表示将卡尔曼滤波识别的质量和刚度代入 Rayleigh 阻尼中计算得到的阻尼矩阵 C 中第 i 行、第 j 列的数值。

利用 Kalman 滤波算法和体系状态方程,并根据

阻尼矩阵 C 可用 Rayleigh 阻尼表示,其形式为:

$$C = aM + bK \quad (5)$$

式中 a 和 b 分别表示比例系数,可由下式确定:

$$\begin{cases} a = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \xi \\ b = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \end{cases} \quad (6)$$

式中 ω_i 和 ω_j 分别表示结构第 i 和 j 阶频率,可通过结构的频率方程求得; ξ 为结构阻尼比,其值可根据中国《建筑结构抗震设计规范》^[22] 中的建议进行确定。

根据结构动力方程以及实测的结构位移响应 u 和速度响应 \dot{u} , 结合 Kalman 滤波方法,对结构的质量和刚度进行识别。此时状态空间方程可以描述为:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} u \\ \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}(aM + bK) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \dot{u} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -I \end{pmatrix} \ddot{u}_g \quad (7)$$

以三自由度串联结构体系为例,将状态方程中的质量和刚度看作未知参数,此时 Kalman 识别中的全部状态量包括:各自由度相对基础的水平位移 $u_{1,0}, u_{2,0}$ 和 $u_{3,0}$; 各自由度相对基础的水平速度 $u_{4,0}, u_{5,0}$ 和 $u_{6,0}$; 各层刚度 u_7, u_8 和 u_9 ; 各层质量 u_{10}, u_{11} 和 u_{12} 。此时三自由度串联结构体系的状态方程可以表示为:

地震前震信号和结构各层响应信号可以识别出近似的结构各层等效质量和等效刚度,建立实际框架结构的等效弹性模型,进而实现推演主震时结构理想弹性状态下的响应。整体计算流程如图 2 所示。

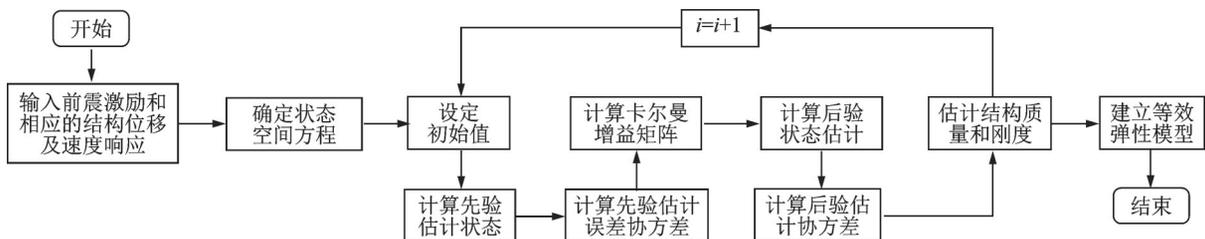


图 2 等效模型建立流程

Fig. 2 Establishing process of equivalent model

2.2 震损结构整体及层间损伤评价方法

为实现对震损结构损伤程度的精确量化,结合广义弹塑性耗能差以及等效弹性模型的建立方法,本文提出基于Kalman滤波及广义弹塑性耗能差的震损结构整体及层间损伤的评价方法及流程。其核心思想是根据前震下真实结构各层的地震响应,借助Kalman滤波建立一个始终处于理想弹性状态的结构等效模型,由该模型计算震损结构在理想弹性状态下的响应,通过比较震损结构在理想弹性状态和实际弹塑性状态下累计变形能的差异性评估震损结构整体和层间的损伤程度。

结构的顶层位移是各层相对位移量累加之和,可通过地震中结构顶层位移或位移角的变化反映结构整体的抗震性能。本文建议将建筑结构的顶层相对位移作为整体性能指标,通过对比结构在实际弹塑性状态以及理想弹性状态下的累计变形能差值评估结构的整体损伤程度,相应的计算公式如下:

$$D_{T,E}(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t \left| \frac{\Delta^2 u_{T,Fi}}{\Delta t^2} \Delta u_{T,Fi} \right|}{\sum_{i=1}^t \left| \frac{\Delta^2 u_{T,Ei}}{\Delta t^2} \Delta u_{T,Ei} \right|} \quad (9)$$

式中 $D_{T,E}(t)$ 表示震损结构在第 t 时刻的整体损伤程度; $u_{T,Fi}$ 和 $\Delta u_{T,Fi}$ 分别表示实测所得震损结构在第 i 时刻的顶层位移和顶层位移增量; $u_{T,Ei}$ 和 $\Delta u_{T,Ei}$ 分别表示根据等效模型得到的震损结构在理想弹性状态下第 i 时刻的顶层位移和顶层位移增量。

按类似思路,结构层间损伤可以通过结构各层间响应的变化来表征,相应的层间损伤计算式为:

$$D_{n,E}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^t \left| \frac{\Delta^2 u_{n,Fi}}{\Delta t^2} \Delta u_{n,Fi} \right|}{\sum_{i=1}^t \left| \frac{\Delta^2 u_{n,Ei}}{\Delta t^2} \Delta u_{n,Ei} \right|}, & n = 1 \\ 1 - \frac{\sum_{i=1}^t \left| \frac{\Delta^2 (u_{n,Fi} - u_{n-1,Fi})}{\Delta t^2} \Delta u_{n,Fi} \right|}{\sum_{i=1}^t \left| \frac{\Delta^2 (u_{n,Ei} - u_{n-1,Ei})}{\Delta t^2} \Delta u_{n,Ei} \right|}, & n \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $D_{n,E}(t)$ 表示震损结构的第 n 层在第 t 时刻的层间损伤程度; $u_{n,Fi}$ 和 $u_{n,Ei}$ 分别表示结构在实测和理想弹性状态下第 n 层第 i 时刻的位移; $\Delta u_{n,Fi}$ 和 $\Delta u_{n,Ei}$ 分别表示第 i 时刻结构第 n 层在实测和理想弹性状态下的相对位移增量; $\Delta(u_{n,Fi} - u_{n-1,Fi})$ 表示 i 时刻结构第 n 层和第 $n-1$ 层在实测状态下的相对位移增量的差值; $\Delta(u_{n,Ei} - u_{n-1,Ei})$ 表示 i 时刻结构第 n 层和第 $n-1$ 层在理想弹性状态下的相对位移增量的差值。

以上方法的计算流程如图3所示。主要步骤如下:(1)在结构上布置传感器,以监测地震动及结构在地震下的位移、速度、加速度等响应信息;(2)地震发生后,立即获取前震记录及相应的结构各层动力响应;(3)通过Kalman滤波算法识别结构各层的等效质量和等效刚度;(4)建立与真实结构弹性状态下响应一致的等效模型,并推演主震下结构的理想弹性响应;(5)提取主震下结构各层的动力响应;(6)根据式(9)计算震损结构的整体损伤程度;(7)根据式(10)计算结构各层的损伤程度。值得指出的是,对

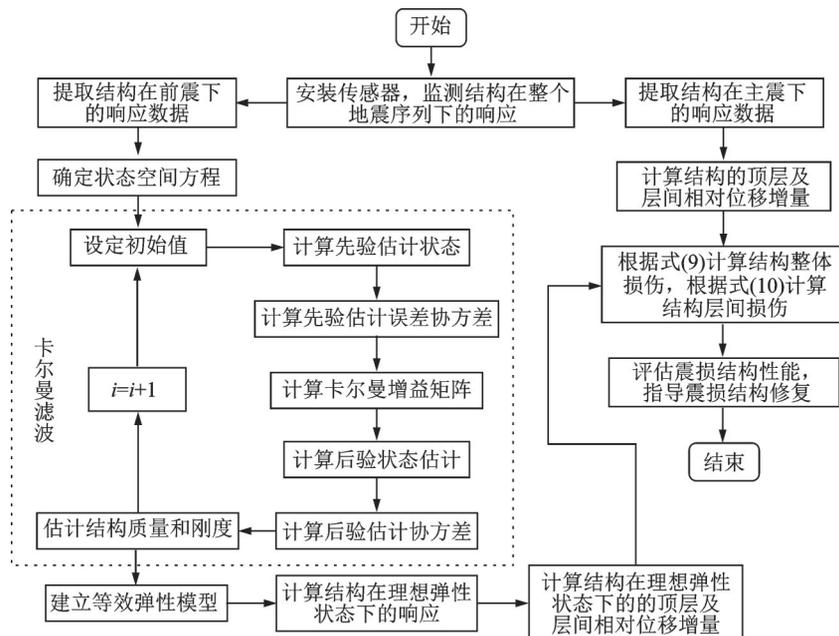


图3 震损结构整体及层间损伤的评价流程

Fig. 3 Evaluation process of overall and interlayer damage of seismic-damaged structure

于实际结构,为保证损伤评估结果的准确性,防止出现局部损伤或偏心等问题干扰评估结果,传感器宜布置于每层楼板质心位置或框架节点附近,并需通过反复迭代使等效弹性模型具有足够的精确度。

考虑实际双向水平地震作用下,结构在两方向上均可产生损伤。若需要进行结构多维损伤评估,可借助动力传感器获取结构在两个主轴方向上的地震动和结构响应,并分别采用上述方法计算震损结构两个主轴方向上的损伤程度,再根据下式综合量化评价结构的整体损伤程度:

$$D_T = \sqrt{D_{T,Ex} D_{T,Ey}} \quad \text{or} \quad \max\{D_{T,Ex}, D_{T,Ey}\} \quad (11)$$

式中 $D_{T,Ex}$ 和 $D_{T,Ey}$ 分别表示震损结构在 x 和 y 两个主轴方向上的整体损伤程度。

整体损伤和层间损伤作为结构损伤在不同层面的量化方式具有密切的内在关联,整体损伤是层间损伤的宏观综合表征,层间损伤是整体损伤的细节表现。考虑各层间损伤对综合损伤的贡献,本文提出以层间累计应变能作为楼层重要性系数的结构整体损伤程度加权计算方法,公式如下:

$$D_T = \sum_{n=1}^m \frac{E_n}{\sum_{n=1}^m E_n} D_{n,E} \quad (12)$$

式中 m 表示建筑结构的总楼层数; E_n 表示震损结构第 n 层的累计弹塑性应变能; $D_{n,E}$ 表示震损结构第 n 层的层间损伤指数。

3 实例分析

为验证本文所提基于 Kalman 滤波及广义弹塑性耗能差的震损结构损伤评估方法的准确性及实用性,以 7 度区某五层和某十层钢筋混凝土框架结构为例进行分析。两个建筑结构的平面布置及立体构造分别如图 4 和 5 所示,结构层高均为 3.3 m,混凝土强度均为 C30,钢筋选用 HRB400,梁、柱截面尺寸分别为 350 mm × 500 mm 和 550 mm × 550 mm,梁、柱配筋率分别为 2.04% 和 1.95%。在 OpenSEES 中建立有限元模型,其中钢筋、核心区混凝土和保护层混凝土的本构模型分别选用 Steel01, Concrete02 和 Concrete01,单元类型选用纤维单元,楼板设置为刚性。

首先,采用九寨沟白河地震台站监测的汶川地震波并将其加速度峰值调至 0.15g 后输入至五层建筑结构模型中进行时程分析。如图 6 所示,调幅后的地震波在前 20 s 的加速度峰值不超过 0.005g,因此可将其视为地震序列中的前震。

随后,提取五层建筑结构在前 20 s 内的位移响

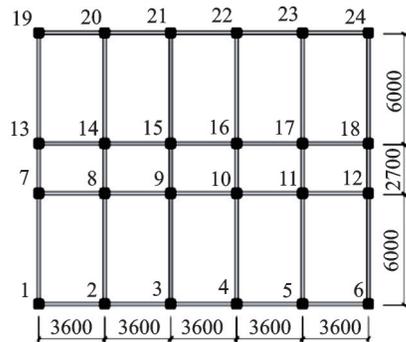


图 4 结构平面布置图(单位:mm)

Fig. 4 Layout of structural plan(Unit: mm)

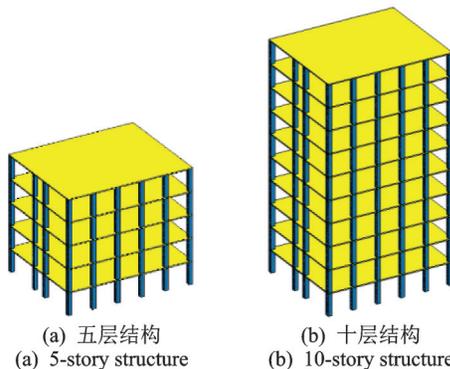


图 5 结构三维示意图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of structure

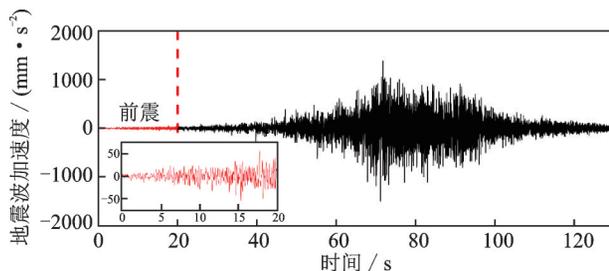


图 6 汶川地震波记录

Fig. 6 Seismic wave record of Wenchuan

应、加速度响应以及地震动信号,结合前述方法对结构各层的等效质量和等效刚度进行识别,部分楼层等效质量和等效刚度的识别结果如图 7 所示。在 Kalman 滤波中结构各层质量和刚度的初始预估值可以根据结构设计详图估算得到。由大量试算得知当质量和刚度的初始预估值与准确值之间的误差在 80% 以内时,可以保证等效弹性模型在前震下的响应与实际结构基本一致。此外,当响应存在一定误差时,可将识别得到的等效质量和等效刚度作为卡尔曼滤波的初始值再次进行识别,直至结构响应基本一致。

根据得到的等效刚度和等效质量建立五层结构的等效层模型,并向等效模型输入汶川地震波进行时程分析,原结构和等效结构典型楼层的位移、速度、加速度响应对比如图 8 所示,可见误差很小。为进一步检验等效模型在不同地震波下的普适性和准

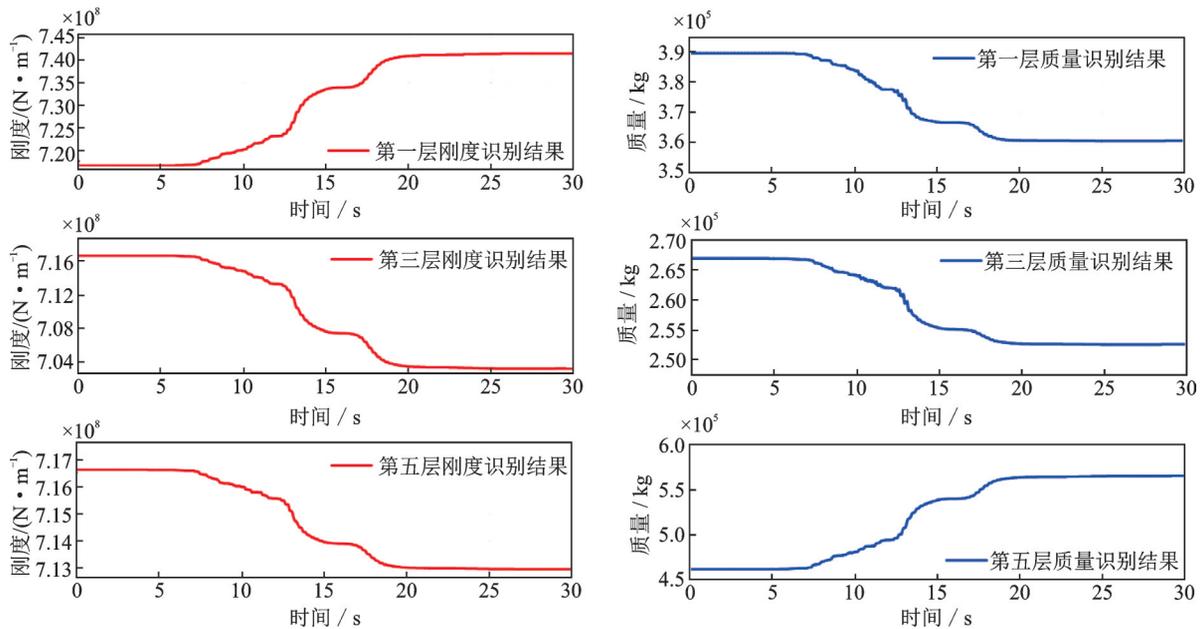


图7 卡尔曼滤波识别结果

Fig. 7 The recognition result of Kalman filter

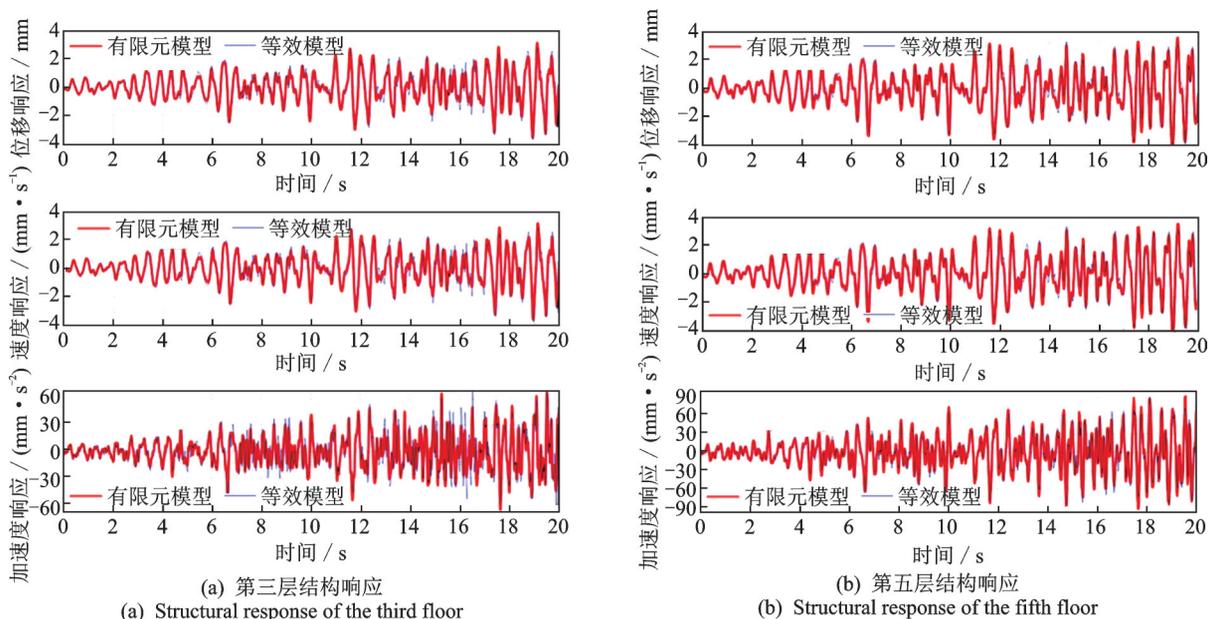


图8 汶川地震波作用下结构第三、五层响应对比

Fig. 8 Responses comparison of the structure's third and fifth floors under Wenchuan wave

确性,向等效模型中输入加速度峰值为0.005g的Loma波,并与有限元模型在相同地震下的响应进行对比,其结果如图9所示。

采用相同的方法,建立十层结构的等效模型。之后,在五层结构和十层结构的有限元模型中分别输入加速度峰值为0.15g和0.30g的汶川波、Loma波、Taft波、El-Centro波等7条不同的地震波,计算结构在不同地震作用下的响应,并将相同的地震波输入至五层及十层结构的等效模型中获取结构在理想弹性状态下的响应。根据建筑结构在理想弹性状态下的响应(利用等效模型获取)和建筑结构在实际弹塑性状态下的响应(由有限元模型直接获取),并

通过本文所提基于Kalman滤波及广义弹塑性耗能差的震损结构损伤计算方法计算结构在不同加速度峰值以及不同地震波下的整体及层间损伤程度,同时与传统弹塑性耗能差方法的结果进行对比。典型地震动下结构整体损伤的对比如图10和11所示,层间损伤最终值的对比如图12和13所示。此外,为了与其他损伤评估方法进行对比,采用文[23]的方法获取由OpenSEES频率求解功能计算出的结构瞬时频率以及由加速度响应进行小波包变换得到的时变频率,对两个建筑结构进行基于频率变化的整体损伤评估,典型结果如图10和11所示。

从图10和11中可以看出,根据Kalman滤波及

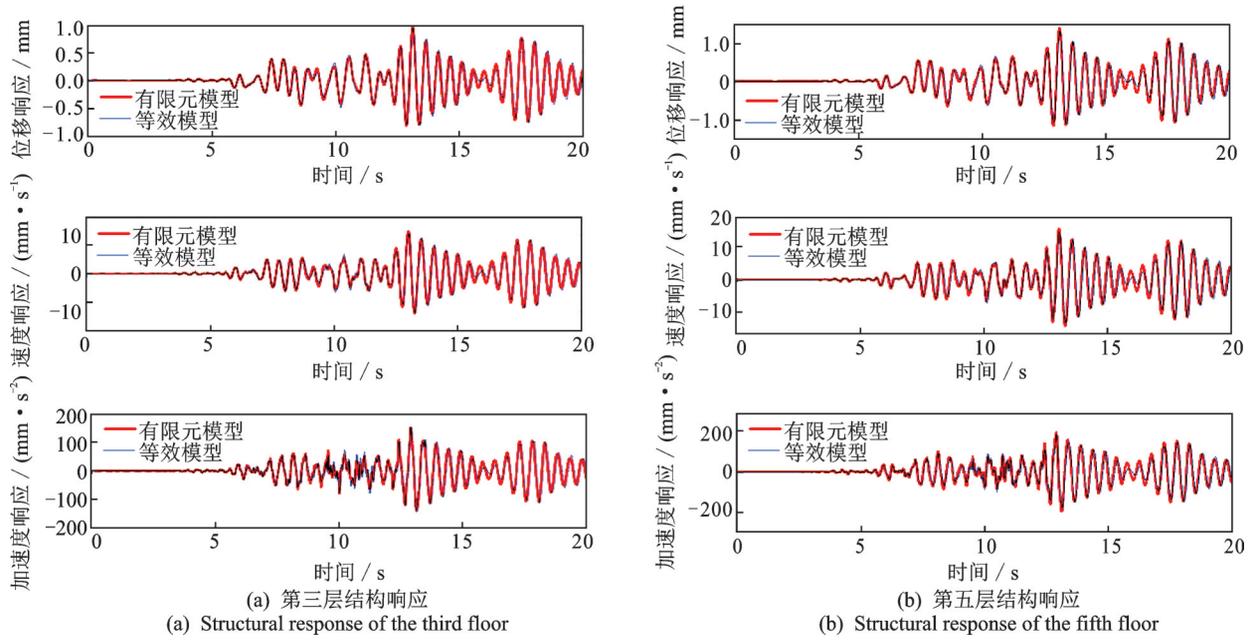


图9 Loma波作用下结构三、五层响应对比

Fig. 9 Responses comparison of the structure's third and fifth floors under Loma wave

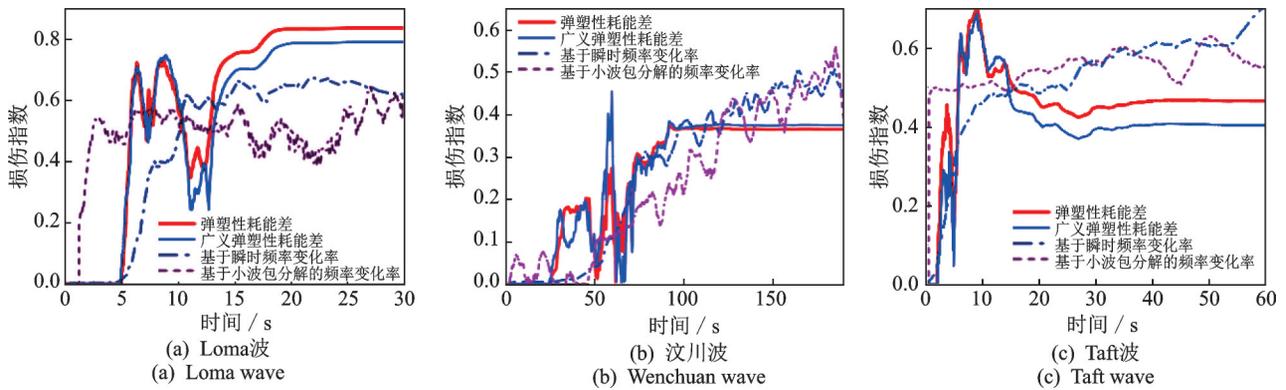


图10 五层结构整体损伤指数 (PGA=0.30g)

Fig. 10 Overall damage index of 5-story structure (PGA=0.30g)

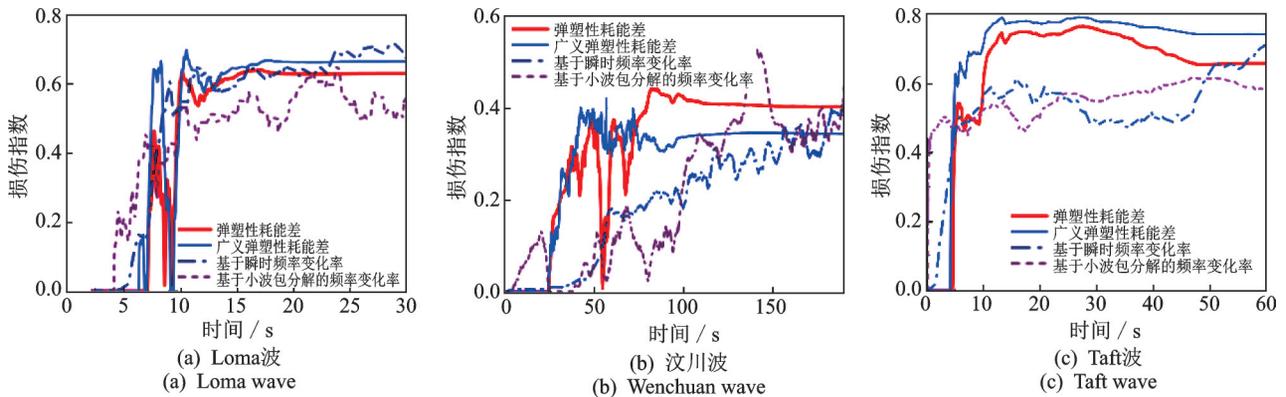


图11 十层结构整体损伤指数 (PGA=0.30g)

Fig. 11 Overall damage index of 10-story structure (PGA=0.30g)

广义弹塑性耗能差方法计算的结构整体损伤及其演变规律与传统弹塑性耗能差方法的计算结果基本相同,由此可证明本文方法在结构整体损伤评估方面具有较高的准确性,且因所用的信息均可在实际监测中获取而具有良好的工程可行性。

由基于瞬时频率变化率以及基于小波包分解的频率变化率的结构整体损伤指数可以看出,这两种方法得到的结构最终损伤程度值与弹塑性耗能差方法以及广义弹塑性耗能差方法的结果大致相同。但由于损伤评价机理不同,使得损伤的演变规

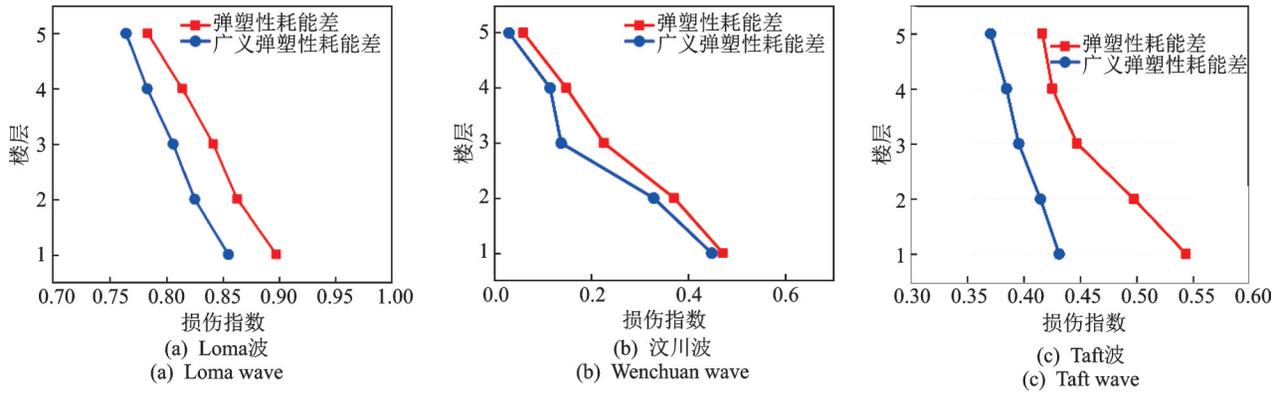


图12 五层结构层间损伤指数 ($PGA=0.30g$)

Fig. 12 Interlayer damage index of 5-story structure ($PGA=0.30g$)

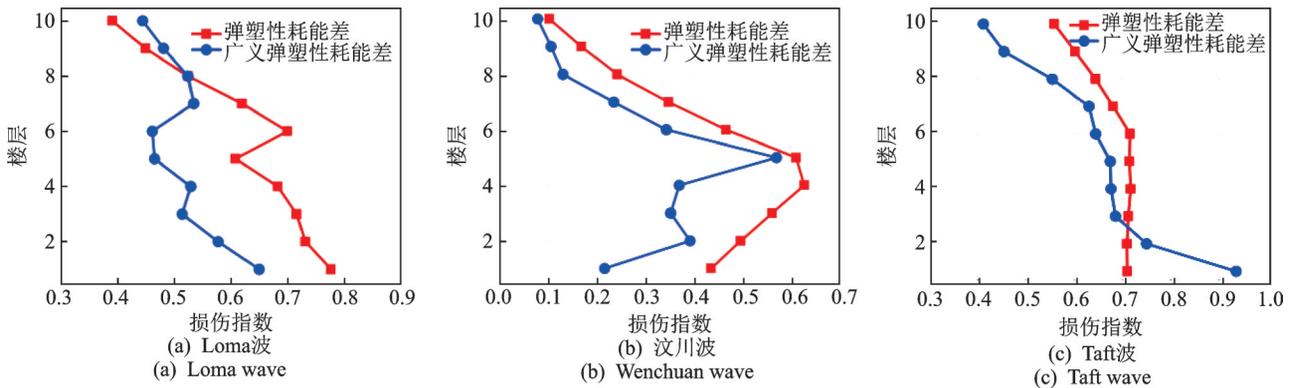


图13 十层结构层间损伤指数 ($PGA=0.30g$)

Fig. 13 Interlayer damage index of 10-story structure ($PGA=0.30g$)

律存在一定的差异,其中基于瞬时频率变化率的损伤演变过程与弹塑性耗能差方法更为接近。但囿于现有信号分析技术,实际结构的瞬时频率尚难以准确提取,且环境噪声对信号分析精度也存在影响,因此,与频率相关的结构损伤评估方法实用性相对较差。

图12和13的结果表明:由广义弹塑性耗能差方法得到的层间损伤值一般均小于传统方法的结果,主要原因是传统弹塑性耗能差方法以相关楼层的所有柱构件剪力之和作为总剪力进行损伤评估,各构

件的剪力时程和方向不完全一致,因此总剪力值有所销减但该结果是真实的。而广义弹塑性耗能差方法将实际结构简化为层间串联体系再计算等效单值剪力,没有考虑各构件剪力的叠合,相对简略。由两种方法得到的各楼层损伤比例关系是接近的,采用广义方法仍然能够较准确地识别出薄弱楼层,可以为结构快速修复提供准确而有效的指导。

在加速度峰值分别为0.15g及0.30g的7条不同地震波下的结构整体及层间损伤统计平均值结果,如图14和15所示。

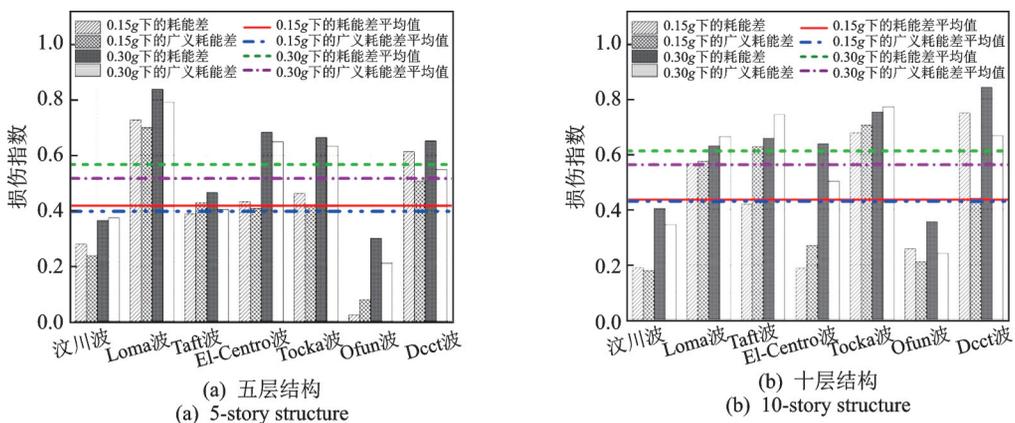


图14 结构整体损伤指数统计值

Fig. 14 Statistical value of structural overall damage index

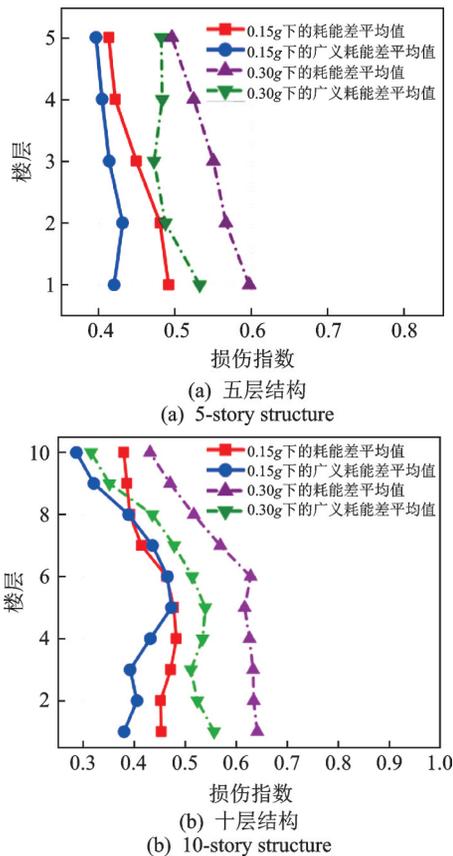


图 15 结构层间损伤指数统计值

Fig. 15 Statistical value of structural interlayer damage index

可以发现:随着地震动幅值增加,结构的整体损伤程度及层间损伤程度不断加剧;受地震波的频谱特性和随机性影响,同一结构在不同地震波下的损伤程度也具有一定的随机性。对于五层结构,由广义弹塑性耗能差方法得到的整体损伤的统计平均结果与传统方法结果十分接近,其最大偏差不超过 $\pm 20\%$,精度良好。对于十层结构,在某些地震下两种方法的整体损伤值偏差较大。这主要是因为随着楼层数的增加,未知物理量增多,Kalman滤波的识别精度有所下降。由两种方法获得的楼层损伤统计平均值比较接近,且各楼层的损伤程度排序和薄弱层的判断依然是基本准确的。由于震后应急评估和抗震救援着重于从宏观层面量化结构整体损伤程度,以判断震损结构的可修性,而对层间损伤程度的关注度相对较小,因此广义弹塑性耗能差方法的精度在统计意义上是满足工程需求的。

五层结构在 $PGA=0.3g$ 的三向汶川波作用下,由式(9)计算得到结构在 x 和 y 两个水平方向上的整体损伤分别为0.37和0.42。根据式(11)得到综合整体损伤指数为0.39。按式(12)得到考虑层间损伤综合影响的结构 x 和 y 方向整体损伤分别为0.40和0.44,综合整体损伤指数为0.42。可见,通过层间损伤计算得到的综合整体损伤指数与直接得到的综合整体损伤指数较为接近,证明本文所提根据层间损

伤量化整体损伤的计算方法是比较准确可行的。

4 结 论

针对目前损伤评估及损伤识别方法在实际工程运用中存在的诸多不足,本文在传统基于弹塑性耗能差的损伤评估方法基础上,用剪力比的形式将结构质量效应消除,提出广义弹塑性耗能差损伤评估方法。利用前震信号识别且利用主震信号进行推演的思路,提出了基于Kalman滤波及广义弹塑性耗能的震损结构整体及层间损伤的评价方法。其主要研究结论如下:

(1) 提出广义弹塑性耗能差损伤评估方法,根据结构或构件在正常运营及损伤状态下的位移、加速度监测信号能够快速量化其损伤程度。

(2) 采用Rayleigh阻尼,结合Kalman滤波识别结构特征物理参数的原理,提出根据前震下的结构响应识别结构等效质量和等效刚度并建立等效弹性模型的方法和流程,力求与实际结构在前震下的响应保持一致,由此计算实际结构在理想弹性状态下的响应。

(3) 针对震损结构提出基于Kalman滤波及广义弹塑性耗能差的震损结构整体及层间损伤评价方法,该方法仅以结构的真实弹塑性响应及由等效弹性模型获取的理想弹性响应作为评判依据,摆脱了目前诸多损伤评价或识别方法需已知结构质量或剪力时程变化的桎梏,具有较高的实用性。

(4) 通过对五层和十层钢筋混凝土框架结构进行分析证明本文所提方法准确性较高,能够反映结构整体损伤的动态演变过程以及结构薄弱层的分布情况,宜在实际工程中推广应用。

综上所述,利用本文所提基于Kalman滤波及广义弹塑性耗能差的损伤评估方法,能够根据结构在前震和主震下的位移及加速度响应及时、准确、合理地量化震损结构的损伤程度,规避了现有损伤评估或识别方法需已知结构质量或剪力等难以实测物理量等不足。该方法能够为实际震损结构损伤评估及修复加固提供有效指导或建议。

参考文献:

- [1] 李宏男,肖诗云,霍林生.汶川地震震害调查与启示[J].建筑结构学报,2008,29(4):10-19.
Li Hongnan, Xiao Shiyun, Huo Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4):10-19.

- [2] 张超, 翁大根, 彭林海. 震损钢筋混凝土结构减震加固研究进展 [J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(3): 112-120+107.
Zhang Chao, Weng Dagen, Peng Linhai. Research review on seismic retrofit of earthquake-damage RC structure by using energy dissipation technology [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(3): 112-120+107.
- [3] 李宏男, 何浩祥. 利用能力谱法对结构地震损伤评估简化方法 [J]. 大连理工大学学报, 2004, 43(2): 267-270.
Li Hongnan, He Haoxiang. A simplified approach for seismic damage assessment based on capacity spectrum method [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 43(2): 267-270.
- [4] 王丰, 李宏男. 基于简化IDA的结构地震损伤评估方法 [J]. 工程力学, 2018, 35(12): 194-202.
Wang Feng, Li Hongnan. Seismic damage assessment procedure of structures by using simplified IDA [J]. Journal of Engineering Mechanics. 2018, 35(12): 194-202.
- [5] 宗周红, 牛杰, 王浩. 基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 121-130.
Zong Zhouhong, Niu Jie, Wang Hao. A review of structural damage identification methods based on the finite element model validation [J]. Journal of Civil Engineering, 2012, 45(8): 121-130.
- [6] Kim Jeong-Tae, Ryu Yeon-Sun, Cho Hyun-Man, et al. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method [J]. Engineering Structures, 2003, 25(1): 57-67.
- [7] Park Y, Ang A H. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [8] Kratzig W B, Meyer I F, Meskouris K. Damage evolution in reinforced concrete members under cyclic loading [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, San Francisco, 1989: 795-802.
- [9] 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, 7(3): 52-58.
Du Xiuli, Ou Jinping. Earthquake damage evaluation model of building structure [J]. World Earthquake Engineering, 1991, 7(3): 52-58.
- [10] 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 Dongsheng, Feng Qimin, Wang Guoxin. A modified Park-Ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life [J]. Journal of Civil Engineering, 2004, 37(11): 41-49.
- [11] 安永辉. 基于振动信息的结构损伤识别的几种新方法 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
An Yonghui. Several new methods for vibration-based damage identification of structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [12] 何浩祥, 陈奎, 范少勇. 基于弹塑性耗能差率的地震损伤评估模型及分析方法 [J]. 振动工程学报, 2018, 31(3): 382-390.
He Haoxiang, Chen Kui, Fan Shaoyong. Seismic damage model based on differential ratio of elastic plastic dissipated energy and application [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(3): 382-390.
- [13] Wu Meiliang, Smyth Andrew W. Application of the unscented Kalman filter for real-time nonlinear structural system identification [J]. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2007, 14(7): 971-990.
- [14] 何浩祥, 吕永伟, 韩恩圳. 基于静动力凝聚及扩展卡尔曼滤波的连续梁桥损伤识别 [J]. 工程力学, 2015, 32(7): 156-163.
He Haoxiang, Lü Yongwei, Han Enzhen. Damage detection for continuous girder bridge based on static-dynamic condensation and EKF [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 156-163.
- [15] Yang J N, Lin S, Huang H, et al. An adaptive extended Kalman filter for structural damage identification [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(4): 849-867.
- [16] 吴新亚, 周丽. 基于有限范围自适应卡尔曼滤波的结构损伤识别方法 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(4): 401-406.
Wu Xinya, Zhou Li. A finite-horizon adaptive Kalman filter for structural damage identification [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(4): 401-406.
- [17] Lei Y, Chen F, Zhou H. An algorithm based on two-step Kalman filter for intelligent structural damage detection [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(4): 694-706.
- [18] 李杰, 陈隽. 未知输入条件下的结构物理参数识别研究 [J]. 计算力学学报, 1999, 16(1): 32-40.
Li Jie, Chen Jun. Identification of structural parameters with unknown input [J]. Journal of Computational Mechanics, 1999, 16(1): 32-40.
- [19] Lei Y, Liu C, Jiang Y Q, et al. Substructure based structural damage detection with limited input and output measurements [J]. Smart Structures & Systems, 2013, 12(6): 619-640.
- [20] Carrella A, Ewins D J. Identifying and quantifying structural nonlinearities in engineering applications from measured frequency response functions [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(3): 1011-1027.
- [21] 何浩祥, 胡一凡, 吴山. 基于耗能差指数和SIR模型的

- 结构易损性及可恢复能力评估 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(4):11-22.
- He Haoxiang, Hu Yifan, Wu Shan. Evaluation of structural vulnerability and resilience based on energy dissipation difference index and SIR model [J]. Journal of Civil Engineering, 2020, 53(4):11-22.
- [22] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [23] 何浩祥,陈奎,闫维明.基于小波包变换和时变频率的结构地震损伤评估 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 23-30.
He Haoxiang, Chen Kui, Yan Weiming. Structural seismic damage assessment based on wavelet packet transformation and time-varying frequencies [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7):23-30.

Rapid damage evolution assessment of seismic-damaged structure by using dynamic response derivation and energy dissipation difference ratio

CHENG Shi-tao, HE Hao-xiang, CHEN Yi-fei

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: According to the accurate and practical damage assessment method, the damage degree of the seismic-damaged structure can be quantified in real time, and the structural repair and reinforcement can be effectively guided. In view of the actual engineering conditions and the shortcomings of the existing damage assessment or identification method in terms of accuracy and feasibility, a generalized damage assessment method is proposed based on the traditional elasto-plastic energy dissipation difference ratio method, which eliminates the influence of mass by shear ratio. The dynamic damage assessment of structure can be realized only by seismic signal and structural dynamic response. On this basis, a method is proposed to deduce the ideal elastic response of the structure by using the foreshock signal and Kalman filter identification technology, and to realize the real-time damage assessment of the whole structure and floors by using the main shock signal. Taking two reinforced concrete frame structure as analysis examples, the results show that the proposed method can accurately indicate the dynamic evolution process of the overall damage and the distribution of weak stories. Compared with the traditional elasto-plastic energy dissipation difference ratio method and the damage assessment method based on frequency change rate, this method has good engineering practicability and can provide effective guidance for the rapid damage assessment of actual earthquake damaged structures.

Key words: damage assessment; seismic-damaged structure; Kalman filtering; overall damage; interlayer damage

作者简介:程时涛(1995—),男,博士研究生。电话:18811040321; E-mail:cst950908@163.com。

通讯作者:何浩祥(1978—),男,教授。电话:18911630792; E-mail:hcx7856@163.com。