

文章编号:1672-6553-2023-21(2)-080-007

DOI: 10.6052/1672-6553-2022-028

易损性分析考虑结构非线性的输入地震波选取方法研究^{*}

谢皓宇^{1,2,3†} 仇文岗³ 牛松山^{1,2} 潘飞^{1,2} 陈忆前^{1,2}

(1. 桥梁工程结构动力学国家重点实验室,重庆 400067)

(2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400067)

(3. 重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

摘要 对于结构抗震设计和研究,地震易损性分析中输入地震波组的选择至关重要,然而现有地震波选取方法对于地震波组的多样性和离散性未作考虑或不够明确,从而影响易损性分析结果的可靠性和意义。针对这个问题,文章提出一个新的选波策略,基于目标结构的简化模型在地震波组激励下的响应,通过改进的地震动强度指标以及信息熵概念来判断输入地震波组的多样性,建立了一个 3 跨连续梁桥的有限元模型作为数值算例,通过执行新提出的方法验证了简化模型响应的信息熵与实际有限元模型响应的信息熵之间的关系,初步证明了此策略基于输入地震动多样性的筛选能力,可以作为地震易损性分析中输入地震波选取的简便和可靠的依据。

关键词 地震易损性分析, 输入地震波, 地震动强度指标, 信息熵

中图分类号:TU973+31

文献标志码:A

Selection of Input Ground Motions for Seismic Fragility Analysis Considering Structural Nonlinear Response^{*}

Xie Haoyu^{1,2,3†} Zhang Wengang³ Niu Songshan^{1,2} Pan Fei^{1,2} Chen Yiqian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics, Chongqing 400067, China)

(2. CMCT Research & Design Institute Co., LTD., Chongqing 400067, China)

(3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract For the structural seismic design and research, the selection of the input ground motions in the seismic fragility analysis is of great significance. However, the conventional ground motion selection methods do not consider the diversity and discreteness of the earthquake group or are not clear enough, which reduces the reliability and significance of seismic fragility analysis. To solve the problem, an innovative input ground motion selection strategy is proposed from the article, based on the response of the simplified model of the target structure under the excitation of the ground motion group, and judges the diversity of the input ground motion group through an improved ground motion intensity measure and the conception of information entropy. A finite element model of a 3-span continuous girder bridge is established as the numerical case study, and the correlation between the information entropy of the simplified model response and the information entropy of the actual finite element model response is verified by implementing the proposed method. The result shows that the strategy is capable of selecting input

2022-05-26 收到第 1 稿,2022-07-21 收到修改稿。

* 国家自然科学基金重点项目,大型非线性结构随机地震动力响应和优化设计理论研究(12032008),National Natural Science Foundation of China: Study on random seismic dynamic response and design optimization theory of large-scale nonlinear structures (12032008).

† 通信作者 E-mail: xiehaoyu@cmhk.com

ground motion group based on its diversity, and it could be utilized as a simple and reliable basis for the analysis and selection of input ground motions in seismic fragility analysis.

-Key words seismic fragility analysis, input ground motion, seismic intensity measure, information entropy

引言

在基于不确定性的结构抗震需求分析模型中,地震易损性评估是结构抗震可靠度评估的一个重要的步骤。通过目标结构有限元模型的大量的非线性动力时程分析,易损性评估可以给出特定强度的地震动作用下结构响应超过某一破坏状态限值的条件概率,而由于结构非线性响应难以预测的特点,时程动力分析中输入地震波组的选取则成为一个关键且复杂的问题。

Bommer 等^[1-2]、Kostinakis 等^[3]以及 Stewart 等^[4]提出以场地条件、台站对地震断层的距离、震级和震源机制等地震信息作为依据,从自然地震波记录中选取相似条件的地震波作为时程分析的输入地震动,这一理论作为基于台站和地震信息的地震动选取方法在 FEMA P695《建筑抗震性能参数评估》^[5]报告中收录,在抽样方法方面近年来季静等^[6]提出了基于拉丁超立方方法的改进。第二种选波方法是基于结构抗震设计反应谱的理念,FEMA 356《建筑抗震及修复》^[7]和我国的建筑、桥梁抗震设计规范中则规定可以通过频域法拟合设计反应谱的人工地震波作为时程分析的输入地震动,和设计反应谱或基于考虑危险一致性的条件目标谱^[8]频域特征相似的自然地震波也可以得到使用,Bradley 等^[9]曾指出基于设计谱的方法对于易损性分析结果的离散性以及不确定性考虑的不足。此外,Takewaki^[10]、谢礼力等^[11-13]和叶列平等^[14-15]则提出和改进了最不利地震动的概念,这个方法考虑了目标结构的非线性特性,在简化的等效单自由度模型上评估地震波所能激励的响应,从而选取对于目标结构最不利的输入地震动,华贝^[16]将单自由度简化模型扩展到多自由度简化模型。以上 3 种方法中,基于台站和地震信息的地震动选取方法具有很大的随机性,没有直接针对地震动所可能激励的响应进行筛选;基于反应谱的地震动选取方法包含自然地震波及人工地震波拟合 2 类情况,所选取的

地震波具有类似的频域特性;基于最不利地震动的选取方法则可以获取对目标结构能激励出最大响应的输入地震动组。

结构的地震易损性分析中所使用的大量的输入地震波应该能够激励目标结构发生尽量多的响应特性,否则会降低易损性曲线的说服力,因此基于反应谱方法以及基于最不利地震动方法所选取的输入地震波在易损性分析中存在一定的缺陷。同时,对于评估大量输入地震动的“多样性”的要求,基于地震动基本信息的选取方法并没有提出一个有效的地震动强度指标。针对以上提到传统的输入地震波选取方法在易损性分析中所存在的缺陷,本文通过改进的基于最不利地震动的地震强度指标,以及输入地震波组“多样性”基于信息论的评估方法,提出一个考虑结构非线性响应的输入地震动选取方法,为地震易损性分析提供合理、高效的输入地震动选取策略。

1 改进的地震动强度指标

1.1 强度指标与损伤指标

地震动强度指标(Intensity Measure)用来表征一条地震波的强度以及对于它目标结构激励的响应大小。地震动强度指标是地震动时程信号的统计信息,包括峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)以及特征周期对应的反应谱加速度等。损伤指标(Damage Measure)和结构响应特性相关,用以评估地震强度的损伤指标常用有建筑的层间位移角、梁桥下部结构的延性位移比等。一般来说,地震动强度指标无法体现结构非线性所带来的体系地震动响应的复杂性及不确定性,然而,使用可以体现结构非线性特征的损伤指标来评估地震动输入的特性时,需要对目标结构的有限元模型进行动力分析,这会带来较高的成本。

在最不利地震动理论的基础上,Honda 等^[17-19]提出了一个以三折线非线性连接的 10 自由度体系模拟了 10 层的钢筋混凝土框架结构,并使

用等延性变形下体系的滞回耗能作为损伤指标,来表现不同地震动的特征.在这个方法中每个非线性弹簧的刚度可根据10层框架结构的实际参数来选取,这样的一个简化模型使得每条地震波的时程分析所耗费的时间大大降低.然而,对于其他的一般结构形式,这个模型很难通过调整非线性连接的本构关系来模拟其动力特性.在本研究中,针对一般结构在地震动输入方向上的前2阶模态频率,建立了一个2自由度、非线性连接的弹簧体系,如图1所示,对于动力特性更复杂的结构则需要适当增加简化模型的自由度数量.通过目标结构有限元模型所计算出的结果,以及求解模态方程得到适合的本构模型的参数,从而模拟出结构的动力特性.

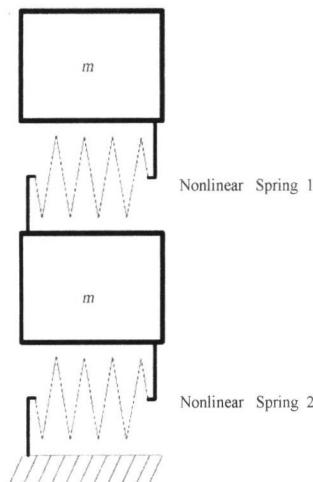


图1 考虑强度参数的一般结构的简化模型
Fig.1 Simplified model of common structures considering intensity measure

1.2 简化模型参数的选取

通过有限元模型的模态分析,可以得到目标结构在地震动分析方向上前2阶的频率 ω_1 和 ω_2 ,假设2自由度的质量均等于 m ,那么针对我们需要求解的2个非线性弹簧的初始刚度 k_1 和 k_2 ,可以建立方程^[20]:

$$\left| \left| \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}^2 - \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \right| \right| = 0 \quad (1)$$

求解式(1),可以得到 k_1 计算结果为 $m\omega_2^2/2$, k_2 计算结果为 $m\omega_1^2$.将有限元模型模态分析得到的指定方向上前2阶振型频率带入结果公式即可求解简化模型中非线性弹簧的初始刚度.

将屈服强度系数 C_y 定义为使目标结构发生

相应模态变形所对应的屈服荷载 F_y 与结构重力 G 的比值.屈服荷载的取值可以通过对目标结构在地震动作用方向上的静力弹塑性分析(Pushover Analysis)来求解,通过屈服强度系数则可以计算出简化模型中屈服强度 Q_1 、 Q_2 的取值均为 $2mgC_y$,其中 g 代表重力加速度.对于一些特殊的结构形式,如果能够判断出结构进入塑性即整体刚度矩阵发生折减所对应的荷载,那么可以仅针对关键连接如塑性铰或者滑动支座等进行拟静力分析,从而得到相应的屈服强度系数以及简化模型中的屈服力.

需要指出,简化模型并不能做到对目标结构的完全还原,它在还原前2阶振型的基础上一定程度地还原了结构的非线性特征,通过候选的地震波组在简化模型上的动力分析从而得到地震动强度指标,可以极大地节约时间成本并选取适合于目标结构进行易损性分析的地震波组.

2 地震波组多样性的评估

2.1 输入地震波多样性的要求

材料非线性、几何非线性导致动力作用下的结构响应具有高度不确定性,难以预测.在有限元动力分析中,一个非线性的结构模型在具有相似地震动强度指标的不同地震波作用下,它的节点位移响应、加速度响应以及单元的弯矩响应等都可能截然不同.针对这个特点,易损性分析通过使用大量输入地震波,并线性地调整时程的幅值以得到某强度指标下,结构发生损伤的概率:

$$P(I^j) = \frac{\sum_{k=1}^n \text{Ind}\{I^j[f^k(t)], I_E^j\}}{N} \quad (2)$$

$$\text{Ind}(a, b) = \begin{cases} 1, & a \geqslant b \\ 0, & a < b \end{cases} \quad (3)$$

式中, I^j 代表强度指标数列, I_E^j 代表结构极限状态下对应的强度指标, $f^k(t)$ 代表地震波组中第 k 条时程, $\text{Ind}()$ 代表易损性计算判断函数.对于易损性分析,显然 N 值取值越大,最终得到的结果的可信度也越高.同时即便 N 值足够大,如果输入地震波都具有相似的特性,那么也认为易损性分析结果的客观性、代表性会受到损害.有鉴于此,本研究提出通过信息熵来衡量地震波组对简化模型的激励响

应的概率密度函数(PDF)的方法,以评估地震波组的多样性。

2.2 概率密度函数对模型响应的描述

在本研究中,简化模型的第二层的自由度的最大位移被选作用以评估结构地震响应的强度指标。对于一个随机指定的地震波组,在简化模型上分别进行时程计算,可以在较短的时间内得到每条地震波所对应的响应强度指标。针对这些离散的数据,将最大值与最小值之间等比例地划分区间,计算每个区间内发生的强度指标的概率即可得到地震波组的 PDF。将 PDF 作为评估输入地震波组多样性的依据,可以在一定程度上代表不同的输入地震波对于非线性结构的动力作用下复杂、难以描述的机理。

2.3 信息熵对“多样性”的量化

对于 PDF 的多样性,本研究中使用信息熵来评估其尺度:

$$H(P) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (4)$$

式中, $H(P)$ 代表概率密度函数 P 对应的信息熵, p_i 代表 PDF 中每个强度指标区间对应的离散的概率值。

信息熵作为信息论中量化度量信源不确定度的常用工具,通过使用其对输入地震波组的 PDF 进行评估,认为可以使输入地震波激励下的目标结构的响应尽量地发散,以概括实际可能发生的全部地震响应状况,为结构抗震设计包括易损性分析提供更可靠的依据。在下一节的数值模拟中,将利用一个 3 跨连续梁桥的实际算例来体现本文评估策略的特性。

3 数值模拟和结果分析

3.1 算例模型

选取了一座 $3 \times 13m$ 空心板结构的连续梁桥作为验证输入地震波组评估策略的模拟算例,上部结构为 70cm 标准空心板梁,宽 9.25m;下部结构为高 5m 双柱墩;支座为圆形板式橡胶支座 GYZ 150 × 42,桥台上分别布置 16 个支座,桥墩上分别布置了 32 个支座;桥墩的材料主要包括 C40 混凝土和 HRB400 钢材。对目标结构建立有限元模型并使用

Lanczos 算法进行特征值分析,桥梁有限元模型见图 2,支座布置在有限元软件中简化为 2 个二折线滞回的一般连接,每个等效连接的纵桥向初始刚度折算后取 11328kN/m(桥墩)以及 5664kN/m(桥台),桥墩的非线性通过将潜在塑性铰区圆形截面进行纤维分割实现,模型弹性阶段的前 10 阶的模态信息见表 1。

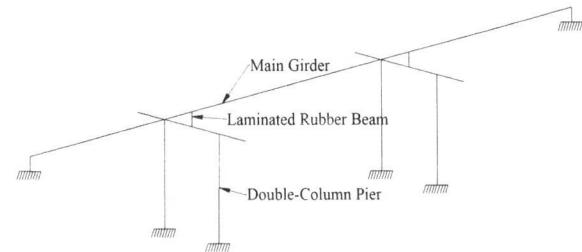


图 2 目标桥梁结构有限元模型示意图

Fig.2 Sketch-up of FEM model for target bridge structure

表 1 目标结构有限元模型前 10 阶振型模态信息表
Table 1 Modal information of the first 10 modes of the target bridge finite element model

Modal No.	Frequency / (rad/s)	Participation Mass in X-axis / %	Participation Mass in Y-axis / %	Participation Mass in Z-axis / %
1	8.87	87.5	0	0
2	9.35	0	84.41	0
3	10.9	0	0	0
4	24.0	0	0	0
5	29.8	0	0	0
6	41.4	0	0	59.03
7	44.4	0	0	0
8	44.5	8.89	0	0
9	69.8	0	0	0
10	69.8	0	12.68	0

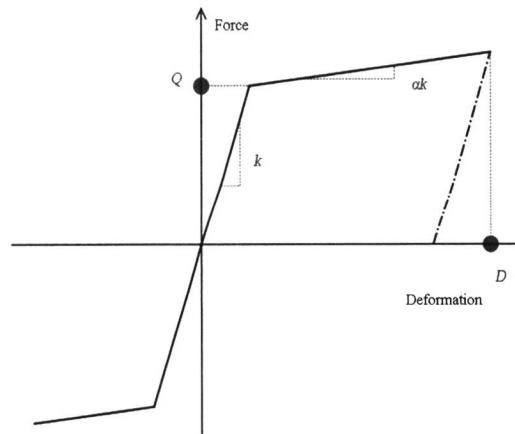


图 3 简化模型非线性弹簧的本构模型曲线
Fig.3 Constitutive model curve of nonlinear springs in simplified model

由于本算例只考虑顺桥向地震动作用,即X向,根据表1,本策略则需要选取第1阶及第8阶所对应的自振频率,分别是8.87rad/s及44.5rad/s。令简化模型中每个自由度质量m取1t,代入公式(3)则有简化模型的两个非线性弹簧的弹性刚度k₁、k₂分别取990kN/m及79kN/m。对于没有制动墩的梁式桥,其简化模型中非线性连接的屈服强度可以由板式橡胶支座的滑动状态来计算,根据相关规范选取支座对应的参数以及极限状态的摩擦系数,可以得到板式橡胶支座进入滑动状态时上部结构的加速度对应为0.2g,那么结构对应的屈服强度系数C_y应取0.2,代入公式,简化模型的屈服强度Q则等于4kN。双折线模型中的刚度折减系数的取值则可以根据不同的材料性质来选取,本研究中取0.1。简化模型两弹簧的本构关系见图3及表2描述。

表2 简化模型非线性弹簧本构参数取值表
Table 2 Constitutive coefficients value of nonlinear springs in simplified model

Nonlinear Spring No.	Elastic Stiffness K / (kN/m)	Yielding Strength Q/kN	Stiffness Reducing Coefficient α
1(2nd Floor)	990	4	0.1
2(1st Floor)	79	4	0.1

3.2 随机地震动组的选取

K-NET及KiK-net记录了日本自1996年起

的主要地震动加速度时程,太平洋地震中心(PEER)则记录了美国自1935年以来主要的地震动数据,而我国的地震台网中心(CENC)记录了自2008年汶川地震以来我国主要的地震动数据。本文从这三个数据库中,以如下规则选取了500条自然地震波的加速度时程记录:(1)选取加速度时程的PGA在0.2g以上的自然地震波加速度时程;(2)对应地震的断层距大于10km,尽量降低近场脉冲效应;(3)对于同一地震的多条加速度时程记录,只选择其中1条记录。对于直接下载的加速度时程原始数据,做以下两个处理:(1)通过傅里叶变换滤波,保留0.1Hz~20Hz的频域成分;(2)基于Wilson校正方法对时程进行速度及位移的基线校准,然后线性缩放其幅值使PGA等于0.3g。

使用Mersenne Twister算法^[21]将处理过后的500条时程随机分为10组,每组50条地震波。将地震波代入上一节所建立的简化模型进行动力时程分析,取二层自由度的最大位移作为地震动强度参数,并根据强度参数的计算结果,手动调整第10组中地震波时程的组成地震波,使第10组的地震波响应分布尽量平均,以期结果和另外随机的9组相对照。根据强度参数的极值范围将区间等分后10组地震波组的PDF见图4,根据公式(4)计算出的相应PDF的信息熵H_s(P)见表3。在图4中,每个子图的横坐标的区间代表了最大响应位移与最小响应位移之间被等分的30个位移区间编号。

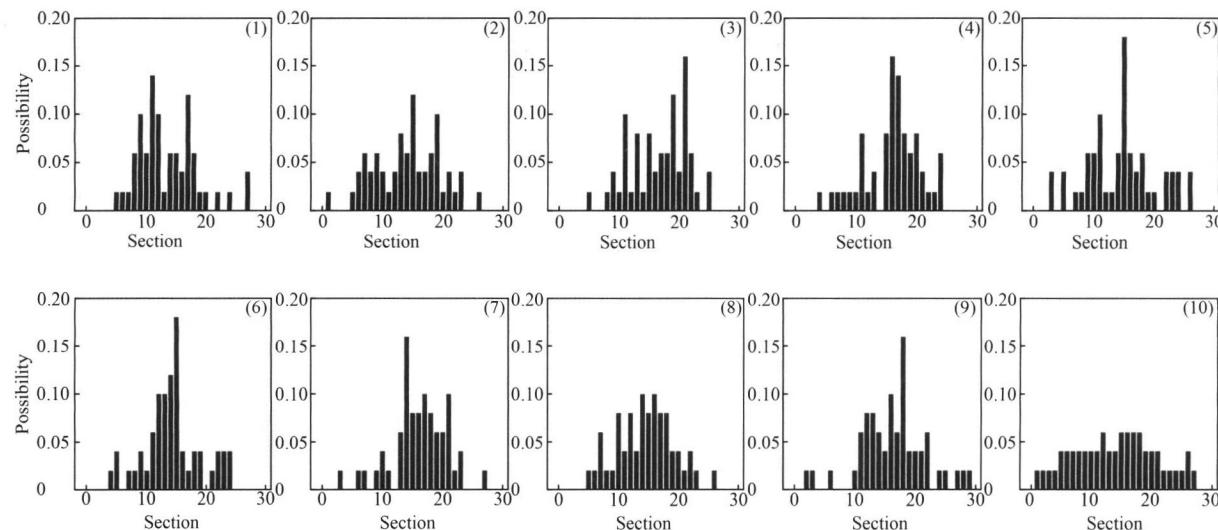


图4 简化模型对不同地震波组响应强度指标的PDF
Fig.4 PDFs corresponding to the intensity measure of different sets of ground motions on simplified model

表3 简化模型对不同地震波组响应强度指标的PDF对应的信息熵

Table 3 Information entropies of PDFs corresponding to the seismic response intensity measure of different sets of ground motions on simplified mode

Ground-Motion Group No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Information Entropy $H_s(P)$	2.72	2.86	2.67	2.68	2.75	2.70	2.67	2.83	2.82	3.22

3.3 数值模拟结果分析

将3.2节所分的10组地震波加速度时程分别

在图2所示的目标桥梁的有限元模型上进行动力计算,对响应结果中上部结构的峰值位移的PDF计算信息熵 $H_t(P)$,结果见表4。

表4 目标桥梁有限元模型对不同地震波组响应强度指标的PDF对应的信息熵

Table 4 Information entropies of PDFs corresponding to the seismic response intensity measure of different sets of ground motions on FEM model of the target bridge

Ground-Motion Group No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Information Entropy $H_t(P)$	2.19	2.35	2.24	2.26	2.30	2.30	2.25	2.34	2.37	2.95

图5绘制了表3及表4中信息熵 $H_s(P)$ 及 $H_t(P)$ 之间的趋势关系。从图中可以看到, $H_s(P)$ 和 $H_t(P)$ 大体上呈现出递增的关系, 这代表了通过简化模型计算得到的高“多样性”的地震波组对目标结构实际的有限元模型也能够激励出更具多样性的响应, 从而使得地震易损性分析的结果更能概括出目标结构的抗震性能, 也验证了本文所提出的输入地震波组选择策略的理论优势。

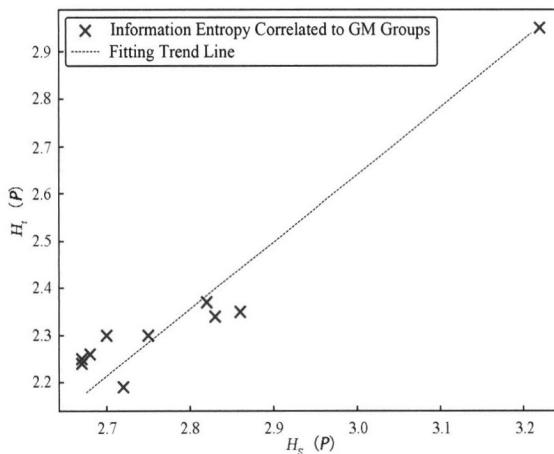


图5 $H_s(P)$ 及 $H_t(P)$ 之间的趋势关系
Fig.5 Trend correlation between $H_s(P)$ and $H_t(P)$

4 结论与展望

针对地震易损性分析中输入地震波的选取问题, 本文提出一个新的策略, 将目标结构简化为非线性的低阶自由度体系, 阶数主要取决于目标结构的复杂程度, 根据算例, 对于普通的梁桥前2阶模态就足够得到相对准确的结果, 并在简化模型的基础上提出了相应的简化计算方法, 再通过地震波组

作用下简化模型损伤指标PDF的信息熵来判断地震波组的“多样性”, 从而得到针对目标结构的最适宜的易损性分析输入地震波组。相对于其他选波方法, 这一方法具有能够描述输入地震波组离散性以及筛选过程快速的特点。算例模拟结果显示: 简化模型和实际有限元模型在地震波组作用下, 响应的多样性程度是一致和匹配的, 即通过本策略所挑选出的高多样性的地震波组对结构所激励的响应可以概括出更多的可能发生的结构响应及损伤。从基于性能的抗震设计理念来说, 此方法可以为结构的抗震设计提供合理、可靠的依据。

对于本文所提出的易损性分析的输入地震波选择方法, 认为还有两个方面是可以继续优化以及值得进一步研究的:(1)基于动力学推导的解析解, 使简化模型可以体现出主要的2个模态的振型参与百分比;(2)在一个随机地震波候选池当中, 通过KL距离(Kullback-Leibler Divergence)、交叉熵(Cross Entropy)等信息论中的工具, 建立快速筛选高信息熵的地震波组的算法, 以消除地震波选取数量以及信息熵计算过程中损伤指标划分尺度所产生的误差。

参考文献

- [1] BOMMER J J, ACEVEDO A B. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(S1): 43—91.
- [2] BOMMER J J, STAFFORD P J. Selecting ground-

- motion models for site-specific PSHA: adaptability vs applicability [J]. Bulletin of Seismological Society of America, 2020, 110(6) : 2801–2815.
- [3] KOSTINAKIS K, ATHANATOPOLOU A. Incremental dynamic analysis applied to assessment of structure-specific earthquake IMs in 3D R/C buildings [J]. Engineering Structures, 2016, 125 : 300–312.
- [4] STEWART J P, CHIOU S J, BRAY J D, et al. Ground motion evaluation procedures for performance-based design [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12) : 765–772.
- [5] The American Society of Civil Engineers (ASCE). FEMA P695 Quantification of building seismic performance factors[R]. Washington DC, 2009.
- [6] 季静, 陈珊珊, 王雨, 等. 改进拉丁超立方抽样选波法对 RC 框架结构地震易损性影响研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(3) : 18–26.
JI J, CHEN S S, WANG Y, et al. Influence of ground motion selection method based on improved Latin hypercube sampling on seismic fragility of RC frame structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(3) : 18–26.(in Chinese)
- [7] The American Society of Civil Engineers (ASCE). FEMA 356 Seismic rehabilitation of buildings[R]. Washington DC, 2000.
- [8] 冀昆, 温瑞智, 任叶飞. 基于条件谱记录选取的工程需求概率危险性计算方法 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8) : 50–57.
JI K, WEN R Z, REN Y F. Engineering demand hazard computation method based on conditional spectrum ground motion selection [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8) : 50–57.(in Chinese)
- [9] BRADLEY B A, BURKS L S, BAKER J W. Ground motion selection for simulation-based seismic hazard and structural reliability assessment [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2015, 44(13) : 2321–2340.
- [10] TAKEWAKI I. Seismic critical excitation method for robust design: a review [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(5) : 665–672.
- [11] XIE L L, ZHAI C H. Study on the severest real ground motion for seismic design and analysis [J]. ACTA Seismological Sinica, 2003, 16(3) : 260–271.
- [12] 翟长海, 谢礼立. 抗震结构最不利设计地震动研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(12) : 51–58.
ZHAI C H, XIE L L. The severest design ground motions for seismic design and analysis of structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12) : 51–58.(in Chinese)
- [13] ZHAI C H, XIE L L. A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: the most unfavorable real seismic design ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(8) : 1009–1027.
- [14] 曲哲, 叶列平, 潘鹏. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(7) : 10–21.
QU Z, YE L P, PAN P. Comparative study on methods of selecting earthquake ground motions for nonlinear time history analyses of building structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7) : 10–21.(in Chinese)
- [15] 施炜, 潘鹏, 叶列平, 等. 基于天际线查询的最不利地震动选取方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7) : 3–11.
SHI W, PAN P, YE L P, et al. Skyline-based most unfavorable earthquake ground motion selection procedure based on skyline query [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7) : 3–11.
- [16] 华贝. 基于简化模型的高层隔震结构地震动记录选取方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
HUA B. Study on ground motion selection of high-rise isolated structure based on simplified model[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [17] HONDA R, AHMED T. Design input motion synthesis considering the effect of uncertainty in structural and seismic parameters by feature indexes [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(3) : 391–400.
- [18] MIYAMOTO T, AHMED T, HONDA R. Synthesis of design input motion reflecting information of possible ground motions[C]. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012.
- [19] HONDA R. Study for implementation of anti-catastrophe-oriented seismic design [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2018, 74(7) : 1078–1086.
- [20] CHOPRA A K. Dynamics of structures-theory and application to earthquake engineering 4th edition [M]. New York: Pearson Education, Inc., 2012.
- [21] MATSUMOTO M, NISHIMURA T. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator [J]. ACM Transactions on Modeling and Computing Simulation, 1998, 8(1) : 3–30.