徐茂臣,宝音图,那仁满都拉,等.强震后城市中小区域建筑群受损概率的快速预测方法[J].地震工程学报,2025,47(6):1380-1387.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240401002

XU Maochen,BAO Yintu,Narenmandula,et al.Rapid prediction method for the damage probability of urban small- and medium-scale building clusters after strong earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2025,47(6):1380-1387.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240401002

强震后城市中小区域建筑群受损概率的快速预测方法

徐茂臣[1],宝音图[1,2],那仁满都拉[3],王鹏翔[1],姚 特[1],王 第[1]

(1. 内蒙古大学交通学院,内蒙古 呼和浩特 010020;
2. 内蒙古大学土木工程废弃物绿色资源化利用研究自治区高等学校重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010020;
3. 内蒙古师范大学地理科学学院,内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要:城市建筑群在强震中的受损概率与其场地条件密切相关。为快速预测中小区域建筑群的震后受损情况,采用半经验法研究建筑受损概率与场地特征的相关性。首先通过收集破坏性地震发生后场地易破坏程度 K 值与实地考察建筑物的破坏情况,构建相关数据库;随机选取数据库中70%的数据拟合出强震后建筑群产生轻度破坏、中度破坏及严重破坏的概率模型,以推测中小区域建筑群强震后受到不同程度破坏的概率;随后,将剩余30%的数据用作测试集,以验证受损概率模型的准确性,结果表明模型具有较高的准确性。将该模型应用于呼和浩特市的赛罕区16个建筑群,进行建筑群受损概率的分析,以证明该模型具有良好的可行性。

关键词:城市建筑群;受损概率;场地效应;HVSR;场地易破坏程度

中图分类号:X43;X915.5;TU42 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2025)06-1380-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240401002

Rapid prediction method for the damage probability of urban small- and medium-scale building clusters after strong earthquakes

XU Maochen[1], BAO Yintu[1,2], Narenmandula[3], WANG Pengxiang[1], YAO Te[1], WANG Di[1]

(*1.School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China;*
2. Key Laboratory of Green Resource Utilization of Civil Engineering Waste at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China;
3. School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: The post-earthquake damage probability of urban building clusters is strongly correlated with local site conditions. Hence, this study employs a semiempirical method to investigate this relationship for the rapid and accurate prediction of damage probability for urban small- and medium-scale building clusters after strong earthquakes. A specialized database was established by compiling field-observed building damage data and corresponding site vulnerability index K-value from destructive earthquakes.

收稿日期:2024-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41967056);内蒙古自然科学基金面上项目(2019ms05082)

第一作者简介:徐茂臣(2000-),男,硕士研究生,研究方向:城市生命线系统抗震韧性。E-mail:xumaochen2022@163.com。

通信作者:宝音图(1980-),男,博士,副教授,主要从事地震灾害评估与防震减灾研究。E-mail:baoyintu@imu.edu.cn。

With the use of 70% randomly selected data from the database, a probability model for slight, moderate, and severe damage in building clusters after strong earthquakes was developed to predict the multi-level damage probabilities of urban small- and medium-scale building clusters. The remaining 30% data served as a test set to validate the damage probability model, with the results demonstrating high predictive accuracy. Application of the model to 16 building clusters in the Saihan District, Hohhot, further confirmed its feasibility for regional damage probability analysis.

Keywords: urban building clusters; damage probability; site effect; HVSR; site vulnerability

0　引言

目前针对建筑物抗震能力的计算大多基于强震发生的假设，且主要集中在对单体建筑物的分析上，研究重心从结构构件逐渐扩展到了非结构构建。虽然建筑物的单体抗震性能至关重要，但地震发生后，建筑群中各建筑物之间的相互作用同样不可忽视[1]。目前，对于建筑群的整体抗震能力的研究较少，主要依据以下三种方法进行：第一种是利用有限元进行建筑群的建模，当建筑物数量较少时，可以对每个建筑物进行逐一建模[2]；然而，当筑群中建筑物数量庞大时，逐一建模的想法难以实现，因此需要借助 GIS 和有限元软件进行建筑群的自动建模[3]，最终均通过输入合适的地震动来分析建筑群的抗震性能。这种方法可实现建筑物的快速建模，得到建筑群大致破坏情况，但是其忽略了建筑物本身结构特性以及所在场地的影响。第二种是利用半理论半经验法，建立包括建筑物结构形式和建造年代的结构易损性矩阵，对建筑群抗震能力进行定量评估[4-5]。第三种方法是基于计算机技术，通过数据库对城市地震灾害情景进行快速匹配，进而对建筑群的抗震情况进行分析预测[6]或通过数据训练利用神经网络对建筑物损伤进行快速判别[7-9]。虽然该方法能较好地预测建筑物损伤情况并已成为主流技术，但其对建筑物所处场地环境影响的考量仍显不足。

建筑物群在震害中的破坏程度主要受三个关键因素影响：地震烈度、建筑物自身结构特性以及场地条件[10]由于地震发生的时间和烈度难以预测，且建筑群地下结构错综复杂，目前对单体建筑地震反应及其与相邻建筑的相互作用机制研究尚未取得突破性进展。此外，建筑群中建筑物在结构类型和建造年代等方面存在显著差异。因此，通过建筑物结构建模并输入相关地震动的方法研究城市中小区域建筑物的受损情况较为困难。建筑物所处的场地条件是影响建筑物抗震性能的重要因素之一。1958 年，Richter[11] 提出了场地效应的概念，即不同的松软沉积层会对地震波产生不同程度的放大作用。早在对日本关东大地震的研究中[12]，就发现木结构房屋的破坏概率与沉积层厚度有着明显的相关性，即沉积层厚度越大，木结构房屋的倒塌概率就越高。1981 年日本修订的“建筑基准法（新抗震标准）”中就提到在砖石结构以及钢筋混凝土结构中也存在类似的规律[12]。土耳其学者 Livaoğlu 等[13]也在震害分析中发现了类似的现象。

采用场地易损性系数，来表征在强震作用下的建筑物，因场地条件差异而产生不同程度的破坏。借助该系数可以较为精确地预测城市中、小区域建筑群的受损概率，判断城市中哪些区域的建筑群是该城市抗震性能较为薄弱的地点，进而帮助防灾工作者做好建筑物加固和灾害应急准备工作。

Nakamura 在 1997 年定义了场地的易破坏程度 K 值[14]，即用场地的放大系数 A 的平方值与场地的卓越频率 f_r 之比来表示，K 值越大则代表建筑物的受损概率也就越大。Nakamura 在对 1989 年美国 Loma Prieta 地震统计研究发现[14]，在 K 值超过 20 的地区，地表建筑在此次地震灾害中遭受到了明显的破坏，而在 K 值小于 20 的地区地表建筑未遭受明显破坏。因此 Nakamura 将 20 视为经验阈值，以此判断地表建筑是否会在地震灾害中遭到破坏[14-15]。在通过对后续文献的梳理和数据统计发现[16]，建筑物是否发生破坏、发生何种程度的破坏，与 K 值是否大于 20 并无太大关联，但是 K 值越大，建筑物发生严重破坏的概率越大，而发生轻度破坏、中度破坏的概率会随着 K 值呈先增大后减小的趋势，即震害分布与场地易破坏程度 K 值有良好的相关性。通过以上研究可以表明，建筑物所处的场地与建筑物在强震后产生的破坏程度存在一定的关联，但是具体是何种关联目前尚不明朗。因此，本文将采用半理论半经验方法寻找出 K 值与建筑物在强震后产生的破坏情况并进行验证，进而用于推测城市中、小区域建筑群在强震后的受损概率。

1　场地效应

1.1　HVSR 方法

水平-垂直谱比（Horizontal-to-Vertical Spectral

Ratio,HVSR)法又称 H/V 谱比法,是 Nakamura 在 1989 年提出的一种评估场地效应的方法[17],在地震工程领域内应用广泛。通常利用微动观测仪来获取场地的微动数据。水平分量 H 和垂直分量 V,在频率域(f)内分别记作 $H(f)$和 $V(f)$,则 HVSR 定义为:

$$HVSR=\frac{H}{V}=\frac{H(f)}{V(f)} \tag{1}$$

在进行微动观测时,微动仪通常会记录三个分量地表微动记录,分别为东西分量 E,南北分量 N 以及垂直分量 Z,对三分量进行傅里叶变换后得到三分量的傅里叶谱,将三分量的傅里叶谱分别记作 $U_E(f)$、$U_N(f)$及 $U_Z(f)$。式(1)中 H 存在东西和南北两个水平分量,共 6 种组合算式求解 H [18],在本文的数据处理中采用式(2)进行 $H(f)$的计算:

$$H(f)=\sqrt{U_E(f)\cdot U_N(f)} \tag{2}$$

1.2 场地卓越频率的获取

使用式(2)计算获得水平分量 $H(f)$,进而通过式(1)求出水平与垂直方向上的傅里叶频谱比,获得 HVSR 频谱比曲线。

曲线的峰值频率与所在场地的沉积层的共振频率相吻合,因此认为 HVSR 的峰值频率即为场地的卓越频率 f_r[19],曲线峰值的振幅为场地放大系数 A 的下限[20]。通常情况下 HVSR 曲线具有一个明显的峰值,通过观察即可直接获得场地的卓越频率以及场地的放大系数的下限 A;若 HVSR 曲线具有多个峰值,这可能是由于实验现场受到的干扰或者与场地的软弱性有关,需要综合考虑钻孔数据或者实验现场的地形进行判断。

1.3 场地易破坏程度的计算

K 值是 Nakamura 在 1997 所定义的量,场地的易破坏程度 K 值越大,建筑物的受损概率也就越大,K 值是由场地的放大系数 A 以及场地的卓越频率 f_r 来表示的[14],即:

$$K=\frac{A^2}{f_r} \tag{3}$$

2 建筑物受损概率模型的建立

2.1 数据描述

文章通过全网搜索引用文献[14]中的 266 篇文章相关数据,找出其中 4 篇具有描述 K 值与震害发生后建筑物受到不同程度破坏的详细参数,除去其中分辨不清的点位,总计收集到 371 组数据[13,16,21-22],这些数据选取自不同震级、不同地区、不同的建筑结构以及不同的地质条件。因此,该组数据是一组适用于多种情形的普适性数据,数据的具体情况如图 1 所示。图中关于建筑物受损等级的描述为:1-未损伤;2-轻度损伤;3-中度损伤;4-严重损伤(轻度损伤:损伤程度0~25%,承重构件未损伤;中度损伤:损伤程度 25%~50%,承重构件轻微损伤,修复后可使用;严重损伤:损伤程度 50%~100%,承重构件损伤,甚至倒塌,需拆除)。数据来源的描述为:1-文献[21];2-文献[22];3-文献[16];4-文献[13]。将全部数据随机划分为两组,其中一组作为训练集,主要用于建立 K 值与建筑物破坏程度之间的相关关系模型(占总数据的 70%);另一组为进行二者相关关系验证的测试集(占总数据的 30%)。将数据训练集按照 K 值大小分成若干区间,计算出每个区间中受到轻度破坏、中度破坏和严重破坏的建筑物数量与建筑物总数之比,将这个比值确定为该组数据的建筑物受到不同等级破坏的概率。

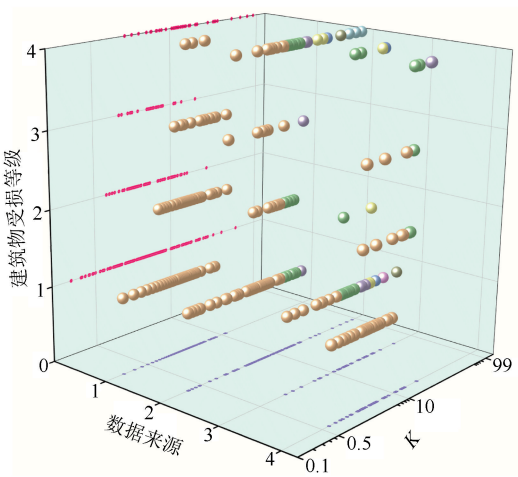

图 1 建筑物不同破坏程度的散点图

Fig.1 Scatter diagram of building damage at different severity levels

2.2 K 值与强震后建筑群发生轻度损伤的概率之间的关系

首先在数据训练集中提取出各个区间内发生轻度损伤概率的建筑物总数,再将该区间发生轻度损伤概率的建筑物总数除以该区间内所有建筑物样本数,得到该区间内建筑物在强震时发生轻度损伤的概率。将此概率与该区间的 K 值进行非线性拟合,结果如图 2 所示。

K 值小于 8.2 时拟合曲线的决定系数 R^2 为 0.999,K 值大于 8.2 时曲线的 R^2 为 0.917。二者均大于 0.9,说明二者拟合良好。

因此,在强震发生后建筑物产生轻度损伤的概率公式为:

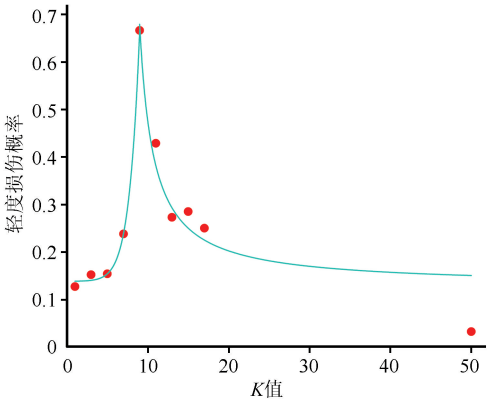

图 2　强震后建筑物产生轻度损伤的概率曲线图

Fig.2　Probability curve of slight damage to buildings after strong earthquakes

$$P_{\mathrm{L}}=\begin{cases}620.645\ 36\mathrm{e}^{-2\left(\frac{K-23.872\ 67}{8.4}\right)^{2}}+0.149\ 97, & K\leqslant 8.2\\ \dfrac{0.107K}{K-6.936\ 93}, & K>8.2\end{cases}\tag{4}$$

式中：P_{L} 为建筑物在强震后产生轻度损伤的概率。由于建筑物所处的场地在 1 km 以内基本不会发生特别大的变化，可以将 K 值观测地点 1 km 范围内视为具有相同的场地效应。因此，P_{L} 可表示为距观测点 1 km 范围内的中、小区域的建筑群在强震发生后发生轻度损伤的概率。

2.3　K 值与强震后建筑群发生中度损伤的概率之间的关系

首先在数据训练集中提取出各个区间内发生中度损伤概率的建筑物总数，接着将该区间发生中度损伤概率的建筑物总数除以该区间内所有建筑物样本数，从而得到该区间内建筑物在强震时发生中度损伤的概率。然后，将此概率与该区间的 K 值进行非线性拟合，结果如图 3 所示。

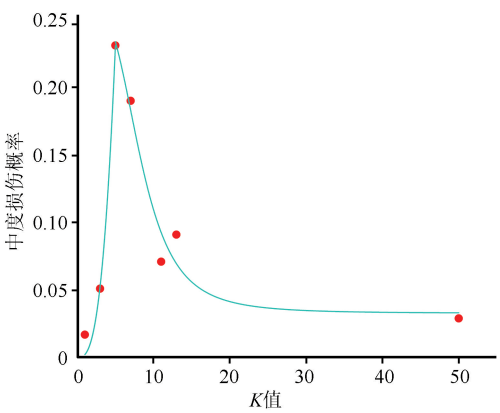

图 3　强震后建筑物产生中度损伤的概率曲线图

Fig.3　Probability curve of moderate damage to buildings after strong earthquakes

K 值小于 4.4 时拟合曲线的 R^2 为0.992，K 值大于 4.4 时曲线的 R^2 为 0.965。二者均大于 0.9，拟合良好。

因此，在强震发生后建筑物产生中度损伤的概率公式为：

$$P_{\mathrm{M}}=\begin{cases}0.004K^{2.8}, & K\leqslant 4.4\\ 0.051+\dfrac{0.233\ 06}{1+\left(\dfrac{K}{6.230\ 45}\right)^{5.671\ 83}}, & K>4.4\end{cases}\tag{5}$$

式中：P_{M} 为建筑物在强震后产生中度损伤的概率。同样，可以将 P_{M} 表示为距观测点 1 km 范围内的中小区域的建筑群在强震发生后发生中度损伤的概率。

2.4　K 值与强震后建筑群发生严重损伤的概率之间的关系

在数据训练集中提取出各个区间内发生严重损伤概率的建筑物总数，再将该区间发生严重损伤概率的建筑物总数除以该区间内所有建筑物样本数，得到该区间内建筑物在强震时发生严重损伤的概率。将此概率与该区间的 K 值进行非线性拟合，如图 4 所示。

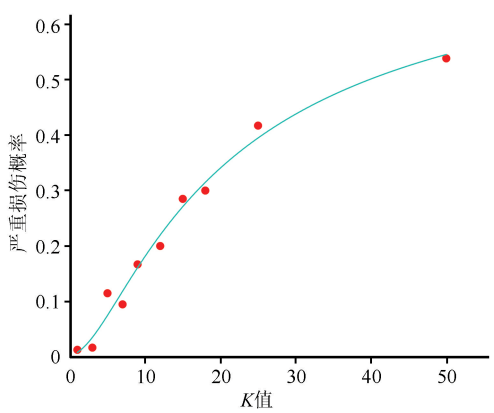

图 4　强震后建筑物产生严重损伤的概率曲线图

Fig.4　Probability curve of severe damage to buildings after strong earthquakes

该拟合曲线的 R^2 为 0.985，当曲线 R^2 大于 0.9，则说明曲线拟合良好。

因此在强震发生后建筑物产生严重损伤的概率公式为：

$$P_{\mathrm{S}}=\mathrm{e}^{\frac{-19.710\ 94}{K+1.585\ 2}}\tag{6}$$

式中：P_{S} 为建筑物在强震后产生严重损伤的概率。我们同样可以将 P_{S} 表示为距观测点 1 km 范围内的中小区域的建筑群在强震发生后发生严重损伤的概率。

3 建筑物受损概率模型的验证

在建造建筑物之前,勘察人员会根据相关建筑规范对拟建建筑所在场地进行勘察,并根据建筑规范寻找合适的建设场地。因此,建筑物所在场地的易破坏程度 K 值主要集中在 0～14 的区间内,由于 K 值大于 14 的场地较少,因此数据集中 K 值大于 14 的样本量也较少。为避免随机取样造成部分数据区间的样本量较少导致误差较大,对建筑群的损伤概率模型进行验证时采用区间验证法。将数据测试集按照数据样本量的多少分成若干 K 值区间,分别计算出数据测试集中该 K 值区间内建筑群在强震时产生轻度损伤、中度损伤和严重损伤的概率,然后利用前文所述的强震后建筑群发生不同程度损伤的概率模型计算该区间在强震后产生不同程度损伤的理论最大值和最小值,若测试集计算出来的真实受损概率在概率模型给出的相应受损程度概率的最大值与最小值之间,可证明其概率模型准确,若不在区间内,则利用式(7)计算二者的相对误差,当相对误差在 5%以内时,同样认定为模型准确。

$$\text{相对误差}=\frac{|\text{预测值}-\text{真实值}|}{\text{真实值}}\times 100\% \tag{7}$$

3.1 强震后建筑群发生轻度损伤的概率模型验证

进行强震后建筑群轻度损伤概率模型的验证,首先根据数据测试集中的建筑物轻度损伤数据样本量划分 K 值区间,通过数据测试集计算该区间强震后建筑群产生轻度损伤的概率,该概率为真实数据值。利用式(4)计算预测出该 K 值区间产生轻度损伤概率的最大值和最小值,具体区间划分和计算数值如表 1 所列。

表 1 轻度损伤概率模型验证表

Table 1 Validation table for the slight damage probability model

K 值区间	预测概率下限	预测概率上限	真实概率	相对误差/%
(0,2]	0.150	0.151	0.143	4.9
(2,4]	0.151	0.159	0.167	4.8
(4,6]	0.159	0.223	0.182	0
(6,8]	0.223	0.641	0.333	0
(8,10]	0.349	0.715	0.5	0
(10,12]	0.254	0.349	0.286	0
(12,16]	0.189	0.254	0.2	0
(16,100]	-	-	-	-

由于建筑物所在场地本身特性,K 值在大于 14 之后数据量开始减少,且数据主要集中在建筑物的严重损坏,因此导致 K 值大于 14 后建筑物发生轻度损伤的样本量减少,进而在随机抽取数据测试集时未在 K 值大于 16 的区间内选取到建筑物产生轻度损伤的样本。上表计算结果表明数据的误差均在 5%以内,因此证明前文中对强震后建筑群产生轻度损伤的概率模型准确。

3.2 强震后建筑群发生中度损伤的概率模型验证

进行强震后建筑群轻度损伤概率模型的验证,首先根据数据测试集中的建筑物中度损伤数据样本量划分 K 值区间,通过数据测试集计算该区间强震后建筑群产生中度损伤的概率,该概率为真实数据值。利用式(5)计算预测出该 K 值区间产生中度损伤概率的最大值和最小值,具体区间划分和计算数值如表 2 所列。

表 2 中度损伤概率模型验证表

Table 2 Validation table for the moderate damage probability model

K 值区间	预测概率下限	预测概率上限	真实概率	相对误差/%
(0,2]	0	0.028	0.029	3.4
(2,4]	0.028	0.194	0.042	0
(4,6]	0.180	0.255	0.182	0
(6,8]	0.096	0.180	0.111	0
(8,14]	0.066	0.057	0.071	0
(14,100]	0.051	0.052	0.050	2

上表的计算结果表明数据的误差均在 5%以内,因此证明前文中对强震后建筑群产生中度损伤的概率模型是准确的。

3.3 强震后建筑群发生严重损伤的概率模型验证

进行强震后建筑群严重损伤概率模型的验证,首先根据数据测试集中的建筑物严重损伤数据样本量划分 K 值区间,通过数据测试集计算该区间强震后建筑群产生严重损伤的概率,该概率为真实数据值。利用式(6)计算预测出该 K 值区间产生严重损伤概率的最大值和最小值,具体区间划分和计算数值如表 3 所列。

表 3 严重损伤概率模型验证表

Table 3 Validation table for the severe damage probability model

K 值区间	预测概率下限	预测概率上限	真实概率	相对误差/%
(0,6]	0	0.074	0.014	0
(6,10]	0.074	0.183	0.091	0
(10,16]	0.183	0.326	0.188	0
(16,18]	0.326	0.366	0.333	0
(18,100]	0.366	0.824	0.385	0

上表的计算结果表明数据的误差均为 0。因此,证明前文中对强震后建筑群产生严重损伤的概率模型是准确的。

4　实例计算

本实例研究选取呼和浩特市赛罕区的 16 个住宅小区进行研究，将每一个住宅小区设定为一个建筑群。基于上述强震后建筑群损伤概率模型的计算结果，可识别出抗震薄弱区域，进而采取针对性措施提升其抗震性能。

4.1　实验观测

实验数据观测采用的是由日本应用地质公司所生产的常时微动仪（图 5），该仪器配备电子数据记录器和GPS天线（用于获取时间及观测点坐标），并配有可调平钢板及三轴加速度传感器（可同步采集南北、东西水平向和垂直向的加速度数据）。

图 5　常时微动仪

Fig.5　Ambient vibration seismometer

实验观测选在了微风、晴朗、干扰少的白天进行，仪器观测到的场地条件在 1 km 的范围内不会发生大的变化，因此可认为以仪器为中心，半径为 1 km的范围内场地条件一致。将仪器放置在待观测区域的中间位置，保证研究区域的所有建筑都在仪器 1 km 的半径范围内。

4.2　数据处理

在结束实验观测及收集基础资料后，对常时微动观测数据进行处理和基础资料分析。首先，采用 50%重叠率的 40.96 s 数据窗进行分段处理，对各时段数据实施快速傅里叶变换，以获取南北、东西的水平向及垂直向频谱。基于式(2)对水平向频谱处理后，通过式(1)计算得到 HVSR 曲线。得到 HVSR 曲线后，曲线的峰值为场地放大系数的下限 A，A 所对应的频率即为场地的卓越频率 f_r，再通过式(3)得到场地易破坏程度 K 值，进而分别利用式(4)、(5)、(6)得到强震后建筑群产生轻度、中度、严重损伤的概率。16 个建筑群的具体计算数值如表 4 所列，其中各建筑群采用字母 A～P 进行命名表示。

表 4　实例计算表格

Table 4　Example calculation table

区域名称	f_r	A	K	轻度损伤概率	中度损伤概率	严重损伤概率
A	4.590	1.578	0.543	0.150	0.001	9.5×10^{-5}
B	1.440	1.950	2.641	0.152	0.061	0.009
C	1.416	2.293	3.713	0.156	0.158	0.024
D	0.879	3.873	17.065	0.180	0.052	0.348
E	1.465	1.662	1.885	0.151	0.024	0.003
F	1.367	2.012	2.961	0.153	0.084	0.013
G	1.343	2.463	4.517	0.165	0.252	0.040
H	1.196	1.263	1.334	0.150	0.009	0.001
I	1.172	2.441	5.084	0.178	0.228	0.052
J	1.172	2.441	1.332	0.150	0.009	0.001
K	0.952	2.107	4.663	0.168	0.246	0.042
L	0.806	2.483	7.649	0.507	0.106	0.118
M	1.416	1.483	1.553	0.150	0.284	0.002
N	1.196	1.741	2.534	0.152	0.283	0.008
O	1.074	2.721	6.894	0.325	0.135	0.098
P	1.147	3.073	8.233	0.680	0.091	0.134

经计算发现，16 个建筑群中，在发生强震后，L、O 和 P 三个建筑群的轻度损伤概率较高；G、I、K、M、N 五个建筑群发生中度破坏的概率较高；D 建筑群发生严重破坏的概率较高。因 D 建筑群在强震后发生严重破坏的概率较高，因此防灾工作者应对其进行相应的加固改造。

5　结论和讨论

(1) 采用半理论半经验方法，通过 HVSR 方法相关理论，收集 K 值与在强震中建筑物发生不同程度破坏的数据，利用数据训练集拟合 K 值与强震发生后建筑物产生轻度损伤、中度损伤和严重损伤的

概率之间的关系，建立了 K 值与三者之间的经验公式。研究人员可以在获取场地的卓越频率后利用文中提出的经验公式获取该场地上的建筑群在强震后受到轻度损伤、中度损伤和严重损伤的概率。

(2) 利用数据测试集对拟合的经验公式进行了验证，结果表明，经验公式的相对误差均在 5% 以下，说明经验公式准确度良好。

(3) 通过对呼和浩特市赛罕区的 16 个建筑群进行强震后建筑群发生轻度、中度和严重损伤的概率计算，认为 D 建筑群的地震易损性较高，应针对性对其进行抗震加固改造，同时也证明了该方法在预测建筑群在强震后的受损概率方面具有很强的可行性。

(4) 本文所提出的模型相对于传统的震后建筑群损伤预测模型来说，避免了对城市建筑群进行大规模的建模，克服了建筑物图纸难以获取、建筑物所处场地条件考虑不足等困难。本文所提模型能够适用于包括了不同类型、建造年代、抗震标准、场地条件的建筑群，应用广泛。同时此模型便于理解、操作简便，工作效率高，便于防灾减灾工作人员进行大规模、快速的应用。

(5) 在后续的研究中我们还会持续补充 K 值与强震发生后建筑物产生轻度损伤、中度损伤和严重损伤之间的关系的数据库，确立误差修正系数，精确 K 值与三者之间的经验公式。同时，还将在下次破坏性地震发生后前往灾区对模型进行实地验证，提升模型的准确度。

参考文献(References)

[1] 贺晨蕊，严磊，刘中宪.城市密集建筑群对沉积谷地地震动放大效应的影响[J].地震工程学报，2019，41(4)：1035-1045.
HE Chenrui，YAN Lei，LIU Zhongxian.Influence of urban intensive building groups on the ground motion amplification effect of an alluvial valley[J].China Earthquake Engineering Journal，2019，41(4)：1035-1045.

[2] WANG D M，GAO Y W.A study on the selection of ground motion measures for seismic capacity assessments of urban building complexes in Weinan[J].International Journal of Disaster Risk Reduction，2019，41：101333.

[3] 林旭川.城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制[J].城市与减灾，2017(3)：18-22.
LIN Xuchuan.Numerical simulation and risk control of earthquake disaster in urban buildings[J].City and Disaster Reduction，2017(3)：18-22.

[4] 范夕森，李少伟.城市建筑群体抗震性能评价在抗震防灾规划中的应用[J].工程抗震与加固改造，2017，39(增刊 1)：63-68.
FAN Xisen，LI Shaowei.Application of earthquake resistance capacity assessment for group of structures in urban planning on earthquake resistance and hazardous prevention[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting，2017，39(Suppl01)：63-68.

[5] 宋立军，唐丽华，尹力峰，等.石河子市建筑物群体易损性矩阵的建立方法及震害预测[J].内陆地震，2001，15(4)：320-325.
SONG Lijun，TANG Lihua，YIN Lifeng，et al.Method for establishing fragile matrixes of groups of buildings in Shihezi City and its earthquake disaster prediction[J].Inland Earthquake，2001，15(4)：320-325.

[6] 陈夏楠，张令心，林旭川，等.基于地震动库的城市地震灾害情景快速匹配算法研究[J].地震工程与工程振动，2021，41(2)：76-83.
CHEN Xianan，ZHANG Lingxin，LIN Xuchuan，et al.Study on matching algorithm of urban seismic scenarios based on ground motion database[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics，2021，41(2)：76-83.

[7] BARTOLI G，BETTI M，MARRA A M，et al.A Bayesian model updating framework for robust seismic fragility analysis of non-isolated historic masonry towers[J].Philosophical Transactions (Series A)，Mathematical，Physical，and Engineering Sciences，2019，377(2155)：20190024.

[8] CAMPOSTRINI G P，TAFFAREL S，BETTIOL G，et al.A Bayesian approach to rapid seismic vulnerability assessment at urban scale[J].International Journal of Architectural Heritage，2018，12(1)：36-46.

[9] MORFIDIS K，KOSTINAKIS K.Approaches to the rapid seismic damage prediction of R/C buildings using artificial neural networks[J].Engineering Structures，2018，165：120-141.

[10] 余大新，耿冠世.利用背景噪声估计华北地区场地放大效应[J].地震工程学报，2017，39(4)：719-724.
YU Daxin，GENG Guanshi.Estimation of site amplification effect in North China from ambient seismic noise[J].China Earthquake Engineering Journal，2017，39(4)：719-724.

[11] RICHTER C.Elementary seismology[M].San Francisco：Freeman and Company，1958.

[12] TAKEYAMA K，HISADA T，OHSAKI Y.Behavior and design of wooden buildings subjected to earthquakes[J].Ⅱ WCEE，Tokyo，1960，28(4)：2093-2111.

[13] LIVAOĞLU H，IRMAK T S，GÜVEN I T.Seismic vulnerability indices of ground for değirmendere (Kocaeli Province，Turkey)[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2019，78(1)：507-517.

[14] NAKAMURA Y.Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor[C]//Proceedings of the World Congress on Railway Research Florence.Firenze，Italy：[s.n.]，1997：56-63.

[15] 宗健业，孙新蕾，张鹏.利用 HVSR 方法研究广州地区的场地效应及估算地震灾害特征[J].地震地质，2020，42(3)：628-639.
ZONG Jianye，SUN Xinlei，ZHANG Peng.Site effect and earthquake disaster characteristics in Guangzhou area from

horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) method[J].Seismology and Geology,2020,42(3):628-639.

[16] GÜVEN İ T. Seismic vulnerability indices for ground in Derince-Kocaeli (NW Turkey)[J].Environmental Earth Sciences,2022,81(5):167.

[17] NAKAMURA Y.A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J].Railway Technical Research Institute,Quarterly Reports,1989,30(12):1218-1233.

[18] 秦彤威，王少疃，冯宣政，等.微动 H/V 谱比方法[J].地球与行星物理论评，2021,52(6):587-622.
QIN Tongwei,WANG Shaotong,FENG Xuanzheng,et al.A review on microtremor H/V spectral ratio method[J].Reviews of Geophysics and Planetary Physics,2021,52(6):587-622.

[19] BONNEFOY-CLAUDET S,CORNOU C,BARD P Y,et al. H/V ratio:a tool for site effects evaluation.Results from 1-D noise simulations[J].Geophysical Journal International,2006,167(2):827-837.

[20] BARD P Y,SESAME P.The SESAME project:an overview and main results[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, BC, Canada, 2004:18-25.

[21] NAKAMURA Y,SATO T,NISHINAGN M.Local site effect of Kobe based on microtremor measurement[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation (EERI). Palm Springs, California: Earthquake Engineering Research Institute,2000:63-70.

[22] AKKAYA İ.Availability of seismic vulnerability index (k_g) in the assessment of building damage in Van,Eastern Turkey [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020,19(1):189-204.

（本文编辑：任　栋）

（上接第 1379 页）

[23] 张若晗，徐佩芬，凌甦群，等.基于微动 H/V 谱比法的土石分界面探测研究：以济南中心城区为例[J].地球物理学报，2020,63(1):339-350.
ZHANG Ruohan,XU Peifen,LING Suqun,et al.Detection of the soil-rock interface based on microtremor H/V spectral ratio method:a case study of the Jinan urban area[J].Chinese Journal of Geophysics,2020,63(1):339-350.

[24] 师黎静，陈盛扬，黎明.哈尔滨季节性冻土场地特征参数研究[J].岩石力学与工程学报，2019,38(5):1053-1063.
SHI Lijing, CHEN Shengyang, LI Ming. Research on the characteristic parameters of Harbin seasonal frozen soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(5):1053-1063.

[25] 孙晓倩，李信富.利用 H/V 谱比法研究长江中下游地区沉积层厚度[J].地球物理学进展，2022,37(6):2301-2307.
SUN Xiaoqian,LI Xinfu.Sedimentary thickness of the middle and lower Yangtze River region obtained from H/V spectral ratio[J].Progress in Geophysics,2022,37(6):2301-2307.

[26] ARIF M, KHAN F, AHMED S, et al. Extreme wind load analysis using non-stationary risk-based approach[J]. Safety in Extreme Environments,2022,4(3):247-255.

[27] ASADI P,ENGELKE S,DAVISON A C.Optimal regionalization of extreme value distributions for flood estimation[J]. Journal of Hydrology,2018,556(1):182-193.

[28] KHASTAGIR A,HOSSAIN I,AKTAR N.Evaluation of different parameter estimation techniques in extreme bushfire modelling for Victoria,Australia[J].Urban Climate,2021,37(5):100862.

[29] REN J Z,SONG J Y,ELLINGWOOD B R.Reliability assessment framework of deteriorating reinforced concrete bridges subjected to earthquake and pier scour[J].Engineering Structures,2021,239(2):112363.

[30] LI H N,ZHENG X W,LI C.Copula-based joint distribution analysis of wind speed and direction[J].Journal of Engineering Mechanics,2019,145(5):04019024.

（本文编辑：任　栋）