

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220821006

基于IDA方法地下结构易损性的地震动记录规模选取*

蒋家卫¹, 高权宝¹, 陈国兴¹, 许成顺², 杜修力²

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211816;

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 旨在研究基于增量动力分析(IDA)方法的地下结构地震易损性分析中地震动记录集规模的选取。基于ABAQUS/Standard软件平台,建立地铁车站结构的土-结构相互作用分析的二维模型,选取了44条远程地震动加速度时程曲线为基准库,采用非线性时程动力分析方法,获取了结构在不同规模地震动记录样本作用下的动力响应。以层间位移角为结构损伤指标,PGA为地震动强度指标,绘制了IDA曲线簇并计算得到了不同工况的50%分位线。基于不同工况的结构震后失效概率与标准值的误差分析发现,地震动样本规模会显著影响地下结构基于IDA方法的地震易损性分析结果,随着评估性能水准等级的提升,地震动记录所带来的影响会越大。研究表明,基于IDA方法的地下结构地震易损性分析应不少于12条地震动记录,最佳输入地震动记录条数为28条。上述成果可为基于性能的地下结构抗震设计分析方法提供科学参考依据。

关键词: 地下结构抗震; 地铁车站; 地震易损性; 增量动力分析; 地震动记录

中图分类号: TU93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1144-09

Quantification of Ground Motion Record Sets Scale in the IDA Method for Vulnerability Analysis of Underground Structures

JIANG Jiawei¹, GAO Quanbao¹, CHEN Guoxing¹, XU Chengshun², DU Xiuli²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816, China;

2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper is to study the selection of the ground motion record sets scale for vulnerability analysis of underground structures based on the incremental dynamical analysis (IDA) method. Utilizing ABAQUS/Standard platform, a two-dimension analysis model of a subway station underground structure was established. 44 time-history acceleration curves derived from far-field ground motion were selected as the standard value. The dynamic response of the structure under different scales of ground motion records was obtained by using the nonlinear time-history dynamic analysis method. The inter-story drift ratio was selected as the damage index, and the PGA was defined as the intensity index. The IDA curve clusters were plotted and the 50% percentile curves under different working conditions were calculated. Based on the error analysis between the post-earthquake failure probability and

* 收稿日期:2022-08-21;修回日期:2022-09-30

基金项目:中国博士后面上基金(2022M711606)、国家自然科学基金联合基金项目(U1839201)资助

作者简介:蒋家卫(1992—),男,博士后。主要从事地下结构抗震研究。E-mail:jjian224@njtech.edu.cn

通讯作者:陈国兴(1963—),男,教授,博导,博士。主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail:gxchen2022@163.com

the standard value of the structure under different working conditions, It was found that the scale of ground motion record sets could significantly affect the seismic vulnerability analysis results of the underground structure based on the IDA method, and the impact will upgrade with the rise of the evaluation performance level. The findings suggest that the ground motion records should not be less than twelve during the IDA-based seismic fragility analysis of underground structure, and the optimal number of ground motion records is 28. The findings can provide a scientific reference for the performance-based seismic design analysis method of underground structures.

Keywords: earthquake resistance of underground structures; subway station; seismic vulnerability; incremental dynamical analysis; earthquake records.

引言

地下空间的开发利用是实现城市可持续发展的重要途径之一。然而,我国半数以上已建或拟建地铁的城市均位于强地震动区域,面临严重地震灾害的潜在威胁。其中,最引起人们关注的是1995年日本阪神大地震^[1],大开地铁站的顶板出现了坍塌破坏,上方地面沉降达到2.5 m,是迄今为止唯一发生完全倒塌的大型断面地下结构。据估计,车站的震后修复成本高达100余亿日元。基于性能的抗震设计强调对结构进行多目标设防,对建筑可能遭受的不同程度损伤(人员伤亡,经济损失,修复成本等)进行概率风险评估,是地震韧性城市建设与发展的科学问题之一。

作为基于性能抗震设计的框架的重要组成部分,地震易损性分析旨在给出结构在不同地震动强度作用下的破坏概率^[2-3]。目前主要有三种手段^[4-6]:专家打分法、历史经验统计法,以及数值分析方法。随着计算机技术的发展,基于数值的地震易损性分析方法被广泛应用于结构的地震易损性分析研究。其中应用最广的地震易损性分析为增量动力分析(IDA)方法。增量动力分析方法通过在结构上施加一系列调幅地震动荷载,以获得结构从弹性至弹塑性的全过程响应分析^[7-9]。自2002年D.Vamvatsiko等^[9]提出并实现IDA方法在结构地震易损性分析中的应用开始,诸多学者已在桥梁^[10]、钢筋混凝土框架结构^[11]、高层建筑^[12]、大坝^[13]等多个领域采用IDA方法进行了地震易损性研究。在地下结构方面,率先开展了以隧道为研究对象的IDA地震易损性研究^[14-16],并与历史经验震害易损性曲线进行了对比。近年来,钟紫蓝等^[17]、J.W.Jiang等^[18-19]也采用了IDA方法开展了地铁站地下框架结构的地震

易损性分析。

合理选择地震动记录是结构地震易损性分析的关键问题之一。温瑞智等^[20]指出同时考虑地震概率危险性和结构自振周期特性的条件均值谱选取强震记录作为IDA的分析输入荷载是非常必要的。聂利英等^[21]也在基于IDA悬索桥地震破坏机理分析中讨论了地震动记录的合理选择问题。此外,其他学者^[22-23]也对IDA方法中地震动记录的选取进行了研究。然而,当前有关IDA方法合理地震动记录选择的研究主要聚焦于地上结构,而基于IDA方法的地下结构地震易损性中地震动记录样本规模的选取研究更是未见报到。

本文以浅埋地下两层双跨地铁站结构为研究对象,基于ABAQUS/Standard有限元软件平台,采用IDA方法开展了基于不同的地下结构地震易损性分析,对比研究了不同工况结构地震易损性曲线模型之间的差异,揭示了地震的记录样本规模对基于IDA方法地下结构地震易损性分析的影响机制。

1 基于IDA方法的地震易损性分析

1.1 基于IDA方法的基本流程

基于IDA方法的地震易损性核心思想是对天然地震动记录进行调幅,然后输入调幅后的地震动记录进行结构的非线性动力时程分析,以获取结构在不同地震动强度作用下的地震响应。如图1所示,为IDA方法的基本流程^[9],假设选取的地震动样本记录为 N 条,其具体步骤如下:

Step1: 基于工程背景,建立土-结构相互作用的有限元分析模型,确定拟输入的地震动记录 $i(i=1)$,将该地震动记录PGA调幅至 $\alpha_{j=1}$,输入地震荷载进行结构的非线性动力时程分析,监测描述结构

损伤的地震响应参数,如层间位移角(IDR)。

Step2:定义结构的倒塌极限损伤指标,若结构响应超越所定义的倒塌极限,返回Step1,对下一条拟输入的地震动记录($i = i + 1$)重复Step1的过程;当 $i = N$ 时,即计算完成。若结构的响应小于结构的倒塌极限,进入Step3。

Step3:令 $j = j + 1$,进一步将PGA调幅至 α_{j+1} ,继续输入地震荷载进行结构的非线性动力时程分析,监测记录结构的地震响应参数,返回Step2,判断是否超越结构的倒塌极限。

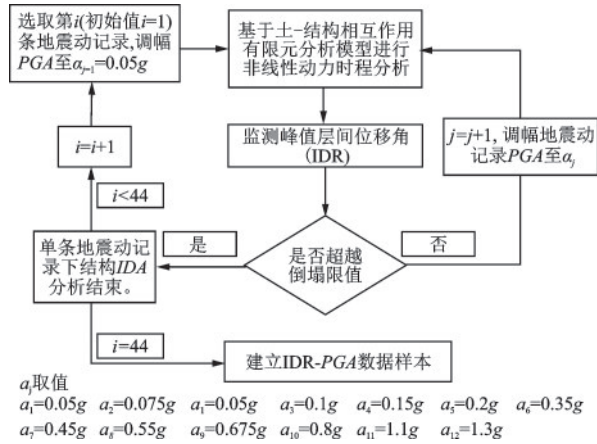


图1 IDA方法的实施流程

Fig.1 The implementation process of the IDA method

1.2 地震易损性分析模型

基于IDA方法获取结构在不同地震动记录作用下的非线性地震响应结果,绘制IDA曲线,并分别计算84%、50%、16%的IDA分位线。假设结构响应整体服从对数正态分布^[24],则以IDA的50%分位线估计结构的均值响应,而结构响应的标准差则可以定义为16%分位线以及84%分位线之间的差值的二分之一,即:

$$\beta_{RTR} = \frac{|R_{16\%} - R_{84\%}|}{2} \quad (1)$$

式中, β_{RTR} 为由地震动记录所引起的不确定性; $R_{16\%}$ 与 $R_{84\%}$ 分别为结构16%分位线与84%的响应结果。

在获取结构的响应均值以及由地震动记录所引起的不确定性,基于式(2)的高斯函数模型计算结构的震后失效概率。

$$P_{LS} = \phi \left[\frac{\ln(S_d/S_c)}{\sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_C^2 + \beta_{MDL}^2}} \right] \quad (2)$$

式中, P_{LS} 为结构的失效概率; S_d 为结构的响应均

值; S_c 为结构的极限抗震能力均值; β_{RTR} 为由地震动记录所引起的不确定性; β_C 为结构记住质量所引起的不确定性; β_{MDL} 为结构模型所引起的不确定性。

2 数值计算

2.1 工程背景

本文选取北京4号线草房地铁车站结构作为研究对象,如图2所示,车站横断面为典型两层双跨矩形框架结构,整体尺寸长×宽:20.9 m×13.8 m,中柱截面为1 m×1.1 m的矩形,侧墙厚度为0.7 m,顶底板厚度为0.8 m,跨度为9 m。结构为钢筋混凝土框架结构,主体部分与中柱混凝土强度分别为C40与C50,主筋型号为HRB335,其中中柱的配筋率为2.7%,结构整体配筋率为0.8%。车站周边土层基本物理力学性质见表1,主要有砂土、黏土和粉土组成,顶板埋深2 m。

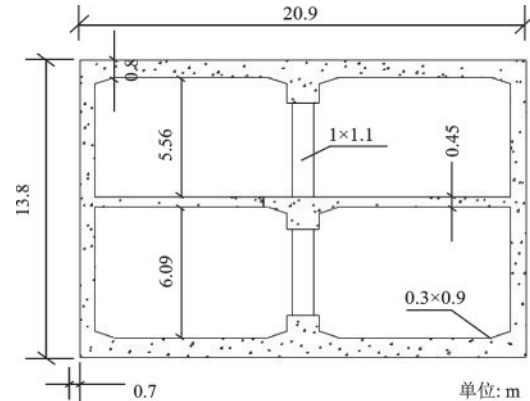


图2 车站断面尺寸信息

Fig.2 The dimension information of subway station cross-section

表1 岩土物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of soil

编号	类型	厚度/m	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	剪切波速/($m \cdot s^{-1}$)	泊松比
1	回填土	2	1 700	147	0.35
2	粉土	6	2 020	190	0.35
3	黏土	7	2 000	193	0.36
4	砂土	2	2 050	274	0.33
5	黏土	10	2 020	300	0.36
6	砂土	3	2 050	328	0.33
7	黏土	2	1 990	331	0.36
8	砂土	6	2 050	368	0.33
9	粉土	7	2 000	382	0.35
10	基岩	—	2 500	700	0.25

2.2 有限元模型

以结构车站横断面为研究对象,基于ABAQUS/Standard^[25]有限元软件平台建立了考虑土-结构相互作用数值分析模型。如图3所示,模型整体高度取至场地基岩面,两侧边界宽度结构尺寸的7倍。由于结构断面在水平地震动作用下可近似为平面应变问题,因此,采用二维实体单元进行模拟土体,结构混凝土被等效为梁单元,钢筋假设为桁架单元,通过关键字*rebar进行定义。为保证网格单元尺寸小于地震波长的1/10^[26],土体单元全局尺寸取0.5m。

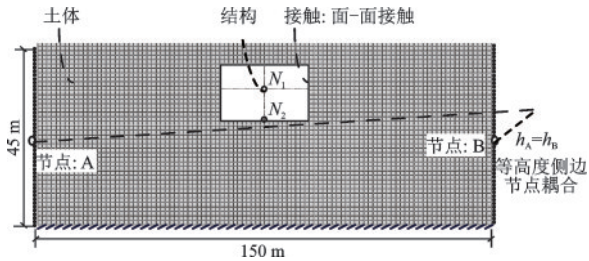


图3 有限元分析模型示意

Fig.3 The diagram of the finite element analysis model

考虑土体在循环荷载作用下的非线性,采用改进的Davidenkov骨架曲线的non-Masing本构模型描述其力学行为^[27],土体的本构关系如图4所示;选用塑形损伤本够描述结混凝土结构在地震动荷载作用下的受拉-压力学行为^[28];钢筋采用理想弹塑性本构进行模拟^[29]。结构与土体接触面之间采用ABAQUS软件中的面-面接触^[30-31],其中径向采用硬接触,切向采用摩擦接触,摩擦系数取0.4。

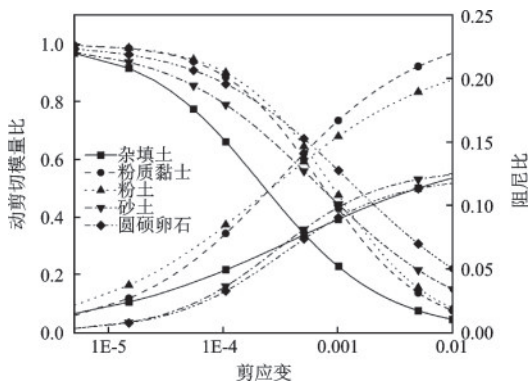


图4 场地岩土力学特性

Fig.4 Geotechnical characteristics of the site

在进行地震荷载输入之前,首先进行模型的地应力平衡,提取重力分析结果的单元应力与边界支反力,然后施加回待分析有限元模型中。由于模型底部已延伸至基岩面,本文采用振动法进行输入,

模型底部固定,两侧采用捆绑边界^[32-33],以模拟场地在水平地震动荷载作用下的剪切运动,即对同一高度的侧边节点进行运动耦合约束。

2.3 地震动记录选取与分析工况

结合研究对象的工程背景,本文首先参考FEMA-P695报告^[34],选取所推荐22条远场强地震动记录,共计44条加速度时程曲线作为标准库,其计算结果作为标准值。为研究不同地震动记录条数对地下结构地震易损性分析的影响,本文共进行10种包含不同地震的记录加速度时程曲线工况的地震易损性分析,详细工况见表2。

表2 地震动样本工况

Table 2 Ground motion records condition

工况编号	样本容量	备注
标准库	44	标准库
1	8	随机选取8条加速度时程曲线
2	12	随机选取12条加速度时程曲线
3	16	随机选取16条加速度时程曲线
4	20	随机选取20条加速度时程曲线
5	24	随机选取24条加速度时程曲线
6	28	随机选取28条加速度时程曲线
7	32	随机选取32条加速度时程曲线
8	36	随机选取36条加速度时程曲线
9	40	随机选取40条加速度时程曲线

3 结果分析

根据文献[35-38]的研究,本文选取PGA作为地震动强度指标,选取层间位移角为结构的损伤指标,有关于结构的震后功能描述与具体层间位移角限值见表3。

表3 矩形框架地铁地下结构性能水准定义^[35]

Table 3 Definition of structural performance level of shallow rectangular subway station^[35]

性能水准	功能状态	定性描述	层间位移角限值
LS1	正常使用	主体与非主体结构没有损伤,设备功能完好,能够正常运行。	0.08%
LS2	可以使用	地铁地下抗震关键构件基本完好,设备功能完好,可以正常运行。	0.29%
LS3	修复使用	地铁地下抗震关键构件发生中度损伤,设备功能整体正常,经修复后可以正常运行。	0.62%
LS4	不能使用	地铁地下抗震关键构件发生不可修复的严重破坏,设备功能失常。	0.92%

本文定义将标准库44条远场地震动加速度时程曲线的计算结果作为标准结果,其IDA曲线簇计算结果如图5所示。如图6所示,为基于不同工况计算所得到的IDA曲线簇以及相应的50%分位线。由图6可知,地下结构IDA曲线簇与地上结构IDA曲线簇具有明显的差异性,由于受周围土体约束,地下结构IDA曲线簇并不会出现常见的“硬化段”,这种现象与文献[39]基于IDA的地下结构分析结果一致。为进一步研究基于不同工况结构响应估计均值之间的差异,图7给出了10组工况IDA的50%分位线的对比图。由图7可知,工况1的50%分位线与标准库之间差距最大,其次为工况4、2、3等。其整体趋势是随着所选地震动加速度时程曲线的增加,其结果与标准库50%分位线差距越近。

但分析结果也会出现地震动记录较多(工况4)的计算结果与标准库结果的差距比地震动记录较少(工况2)的更大,这是由于地震动记录选择偶然性所带来的。

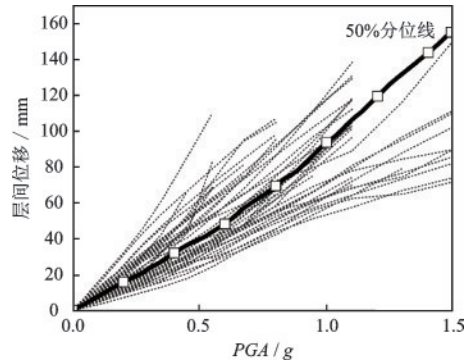


图5 基于标准库计算的IDA曲线簇
Fig.5 IDA curve cluster based on standard sample

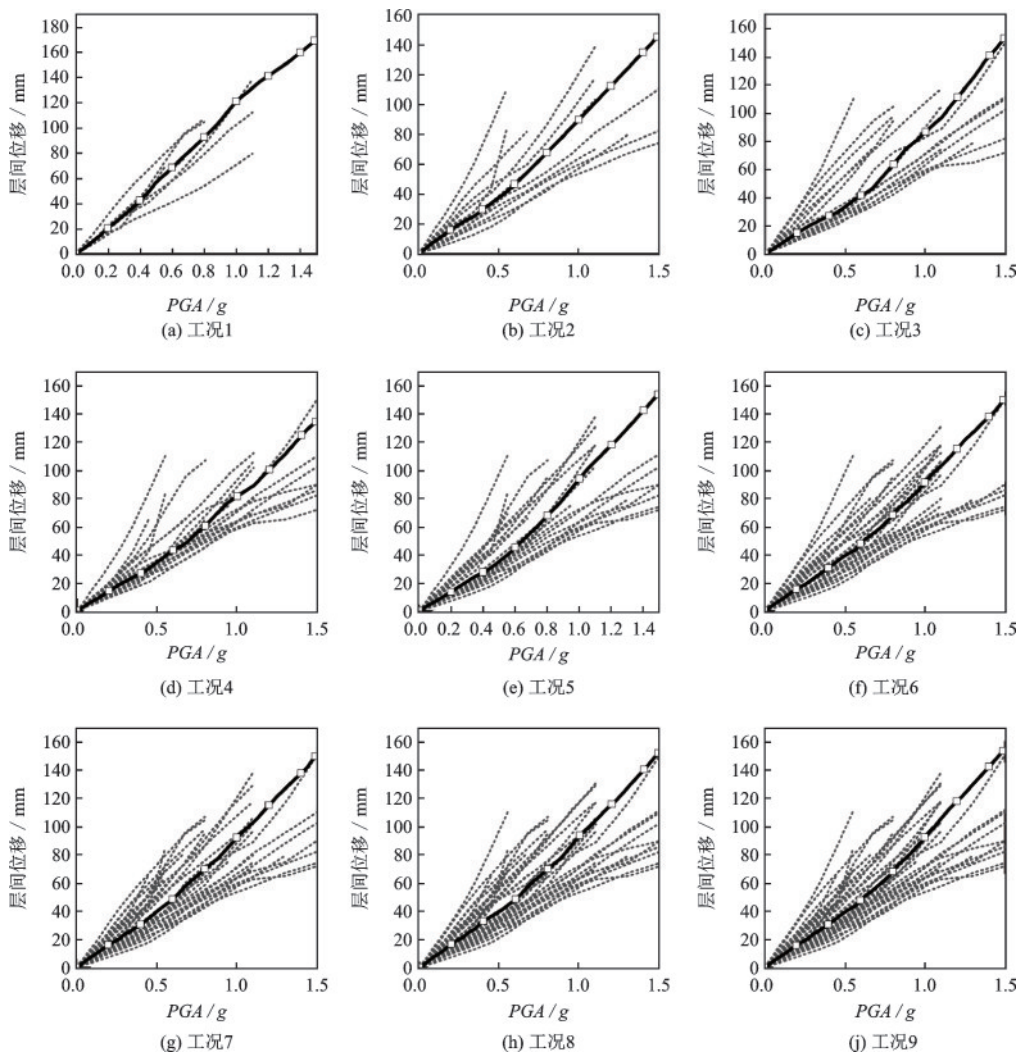


图6 不同工况的IDA曲线簇
Fig.6 IDA curve clusters of different working conditions

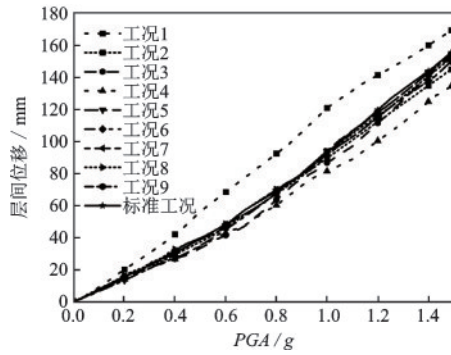


图7 不同工况IDA的50%分位线对比

Fig.7 Comparison of 50% percentile line of IDA under different working conditions

如图8所示,为不同工况的层间位移角统计标准差,可以看出,除工况1、2、3的层间位移角的标准差值相对较大,随着工况的递增,结构响应标准差整体呈现减小的趋势,但之间的变化值较小,这种趋势符合概率统计学原理,即样本容量越大,数据的离散性越小。由此可以看出,当所选地震动数量较小时,层间位移角计算结果的离散性相对较大,而当所选地震动样本记录大于20时,基于IDA方法所得标准差值趋向于稳定。

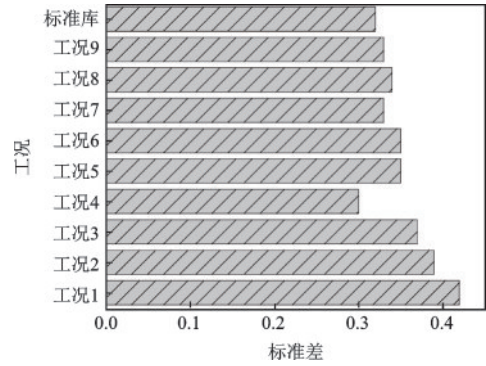


图8 层间位移角统计标准差

Fig.8 Statistical standard deviation of inter-story displacement ratio

基于50%的IDA分位线以及计算的层间位移角标准差结果,采用式(2)地震易损性函数分别建立了结构超越不同性能水准等级的地震易损性曲线,如图9所示。由图9可知,除工况1,其它工况所得到的结构破坏概率基本小于标准值,并且基于工况1的地震易损性曲线与标准地震易损性曲线相差最大。为了进一步研究不同工况计算结果的精度,以不同工况计算结果与标准库的分析结果的最大绝对概率差为评判标准。

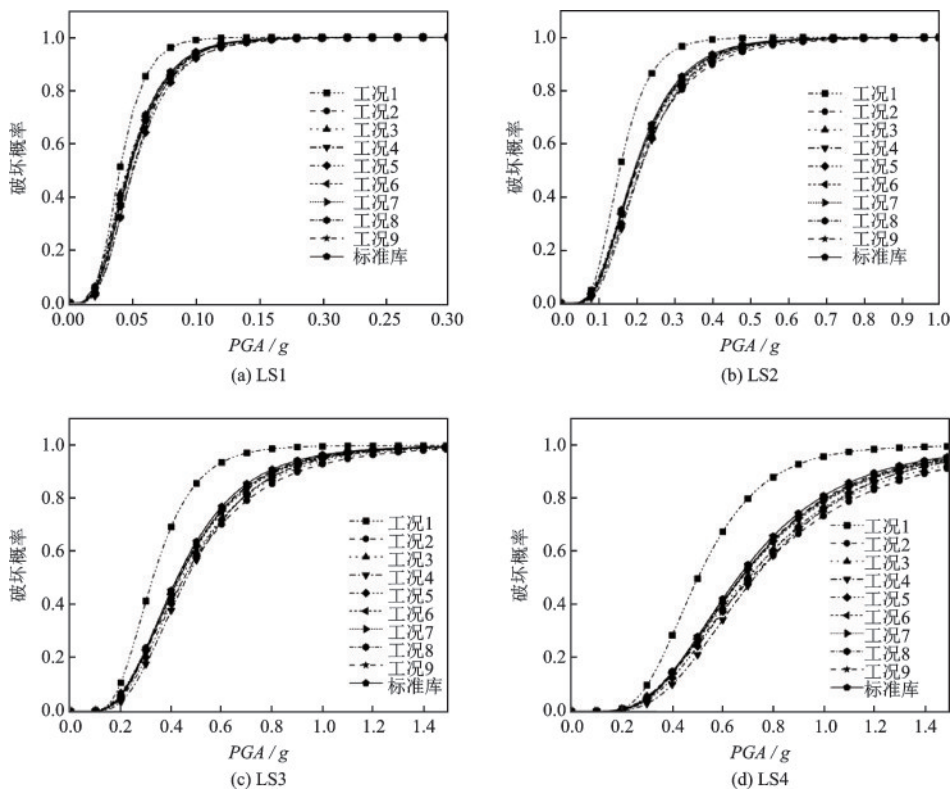


图9 基于不同工况建立的地震易损性曲线

Fig.9 Seismic fragility curves established based on different working conditions

如图 10 所示,随着所评估性能等级的提高,不同工况与标准库分析结果之间的差值逐渐增大,例如,当评估结构性能等级 LS1 时,工况 1 计算结果与标准值之差为 19%,而在评估结构性能等级 LS4 时,工况 1 计算结果与标准值之差为 22.9%。分析认为,这是由于诱发结构产生低等级破坏的所需地震动强度往往较低,而在地震动强度较低时,结构地震易损性分析受地震动样本容量的影响可能更小。

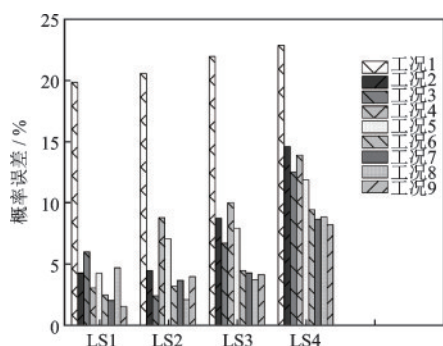


图 10 各工况与标准值之间最大绝对概率差

Fig.10 The maximum absolute probability difference of analysis results between each condition and standard

由图 10 可知,随着工况编号的递增,最大绝对概率差呈现整体逐渐减小的趋势,尤其是从工况 1 转为工况 2 时,其结果与标准值的差值迅速减小。以评估性能等级 LS4 为例,工况 1 的评估概率与标准值差距为 22.9%,工况 2 仅为 14.6%,由此说明,当地震动记录由 8 条增加至 12 条时,地下结构基于 IDA 方法的概率评估精度可以取得显著的提升。进一步观察可知,工况 6、7、8、9 与标准库的地震动易损性分析结果绝对概率差大部分在 5% 以内,并且自工况 6 开始,评估结果变化非常微小。由此说明,自工况 6 开始,即当地震动加速度时程曲线增加至 28 条后,继续增加地震动记录数量几乎不再影响当前地下框架结构基于 IDA 方法的地震动易损性分析结果。

综上所述,地震动记录样本规模的选取对于地下结构基于 IDA 方法建立概率地震需求分析模型、结构层间位移角离散性以及地震易损性分析曲线均有显著影响。其中所选地震动加速度时程曲线小于 8 条时,计算误差最大,当地震动记录增加至 12 条后,计算精度会得到显著提高,其绝对概率误差能控制在 15% 以内。当地震动加速度时程曲线增加至 28 条后,其评估较低等级性能水准的绝对概率误差基本可控制在 5% 以内,继续增加地震动记录

样本,其计算结果变化相对较少。因此建议在采用 IDA 方法进行地下结构地震易损性分析时,应至少选择 12 条以上地震动加速度时程曲线,最佳地震动记录条数为 28 条。然而,值得注意的是,本文的计算工况均限定于远场强地震动记录集。

4 结 论

以浅埋地铁车站地下结构横断面为研究对象,基于 ABAQUS/Standard 有限元软件平台,建立了考虑土-结构动力相互作用的非线性二维有限元分析模型,采用 IDA 方法开展了基于不同地震动样本容量调幅的地震动易损性分析。以 44 条远场强地震动记录的分析结果作为标准,通过对比研究不同工况的分析结果可以得到以下结论。

基于 IDA 方法的地下结构地震易损性分析,其概率地震需求模型、层间位移角离散型以及地震易损性曲线受所选地震动记录样本规模影响较大。随着地震动记录条数的增加,结构的地震动易损性分析结果会逐渐趋向于标准值,尤其当所选地震动记录由 8 条增加至 12 条时,其计算精度可得到显著提升。最佳输入地震动条数为 28 条,在此工况下,在评估较低性能水准状况时的绝对概率差能达到 5% 以下,在此基础上继续增大地震动记录规模,对结构的最终评估结果影响甚微。值得注意的是,地震动样本容量对结构高等级性能水准的评估结果影响程度明显大于较低等级的性能水准。

参考文献:

- [1] Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. Soils and Foundations, 1996, 36: 283-300.
- [2] FEMA-P58-1. Seismic performance assessment of buildings (volume 1-Methodology) [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2018.
- [3] FEMA-P58-2. Seismic performance assessment of buildings (volume 1-Methodology) [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2018.
- [4] ATC-40. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Concrete Building [S]. Red Wood City: Applied Technology Council, 1996.
- [5] Jalayer F, De Risi R, Manfredi G. Bayesian cloud analysis: efficient structural fragility assessment using linear regression [J]. Bulletin of Earthquake Engineering,

- 2015, 13(4): 1183-1203.
- [6] Rossetto T, Ioannou I, Grant D. Existing empirical fragility and vulnerability relationships: compendium and guide for selection [R]. Pavia:GEM Foundation, 2013.
- [7] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 491-514.
- [8] Vamvatsikos D, Fragiadakis M. Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(2): 141-163.
- [9] Vamvatsikos D, Cornell C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 523-553.
- [10] Mander J B, Dhakal R P, Mashiko N, et al. Incremental dynamic analysis applied to seismic financial risk assessment of bridges [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(10): 2662-2672.
- [11] Jia D W, Wu Z Y. Seismic fragility analysis of RC frame-shear wall structure under multidimensional performance limit state based on ensemble neural network [J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 112975.
- [12] He X, Lu Z. Seismic fragility assessment of a super tall building with hybrid control strategy using IDA method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 123: 278-291.
- [13] Hariri-Ardebili M A, Saouma V E. Seismic fragility analysis of concrete dams: A state-of-the-art review [J]. *Engineering Structures*, 2016, 128: 374-399.
- [14] Andreotti G, Lai C G. Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 103008.
- [15] Avanaki M J, Hoseini A, Vahdani S, et al. Seismic fragility curves for vulnerability assessment of steel fiber reinforced concrete segmental tunnel linings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 259-274.
- [16] Huang Z K, Pitilakis K, Tsinidis G, et al. Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: The case of Shanghai metropolitan system [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 98: 103341.
- [17] 钟紫蓝, 甄立斌, 申铁尧, 等. 基于耐震时程分析法的地下结构抗震性能评价 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(8): 1482-1490.
- Zhong Z L, Zhen L B, Shen Y Y, et al. Seismic performance evaluation of underground structures using endurance time analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(8): 1482-1490. (in Chinese)
- [18] Jiang J W, Ngggar H Mel, Xu C S, et al. Effect of ground motion characteristics on seismic fragility of subway station [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 143: 106618.
- [19] Jiang J W, Xu C S, Nagggar H Mel, et al. Improved pushover method for seismic analysis of shallow buried underground rectangular frame structure [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 140: 106363.
- [20] 温瑞智, 尹建华, 冀昆, 等. 结构需求概率危险性分析中强震记录选取研究 [J]. *土木工程学报*, 2018, 51(增2): 35-40.
- Wen R Z, Yin J H, Ji K, et al. The research of strong ground-motion records selection for estimating the structural demand hazard curve [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(Sup2): 35-40. (in Chinese)
- [21] 聂利英, 陈佳彬, 刘群, 等. 基于 IDA 方法的悬索桥地震破坏机理分析中地震输入合理选择 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48(6): 64-72.
- Nie L Y, Chen J B, Liu Q, et al. Reasonable selection of earthquake inputs in seismic damage analysis of suspension bridges based on IDA method [J]. *China Civil Engineering*, 2015, 48(6): 64-72. (in Chinese)
- [22] Bayati Z, Soltani M. Ground motion selection and scaling for seismic design of RC frames against collapse [J]. *Earthquakes and Structures*, 2016, 11(3): 445-459.
- [23] Kiani J, Khanmohammadi M. New approach for selection of real input ground motion records for incremental dynamic analysis (IDA) [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 19(4): 592-623.
- [24] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(4): 526-533.
- [25] Keskin I, Ahmed M, Taher N, et al. An evaluation on effects of surface explosion on underground tunnel; availability of ABAQUS Finite element method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 120: 104306.
- [26] 廖振鹏, 刘晶波. 离散网格中的弹性波动 (I) [J]. *地震工程与工程振动*, 1986, 9(2): 1-9.
- Liao Z P, Liu J B. Elastic wave motion in discrete grids [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1986, 9(2): 1-9 (in Chinese)
- [27] Chen G X, Wang Y Z, Zhao D F, et al. A new effective stress method for nonlinear site response analyses

- [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, 50(6): 1595-1611.
- [28] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [29] Besseling J. A theory of elastic, plastic and creep deformations of an initially isotropic material showing anisotropic strain-hardening, creep recovery, and secondary creep [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1959, 25: 529-536.
- [30] Xu Z G, Du X L, Xu C S, et al. Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 116: 242-252.
- [31] Zhao K, Wang Q Z, Zhuang H Y, et al. A fully coupled flow deformation model for seismic site response analyses of liquefiable marine sediments [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 251: 111144.
- [32] Argyroudis S, Tsiniadis G, Gatti F, et al. Effects of SSI and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 98: 244-256.
- [33] Hleibieh J, Wegener D, Herle I. Numerical simulation of a tunnel surrounded by sand under earthquake using a hypoplastic model [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(4): 631-640.
- [34] FEMA-P695. Quantification of building seismic performance factors [R]. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [35] 杜修力, 蒋家卫, 许紫刚, 等. 浅埋矩形框架地铁车站结构抗震性能指标标定研究 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(10): 111-119, 128.
- Du X L, Jiang J W, Xu Z G, et al. Study on quantification of seismic performance index for rectangular frame subway station structure [J]. *China Civil Engineering*, 2019, 52(10): 111-119, 128. (in Chinese)
- [36] 张成明, 钟紫蓝, 甄立斌, 等. 适用于圆形隧道损伤评价的震动强度指标研究 [J]. *工程力学*, 2021, 38(1): 100-108.
- Zhang C M, Zhong Z L, Zhen L B, et al. Seismic intensity measures for the damage evaluation of circular tunnels [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(1): 100-108. (in Chinese)
- [37] Du X L, Jiang J W, Naggar M H, et al. Interstory drift ratio associated with performance objectives for shallow-buried multistory and span subway stations in inhomogeneous soil profiles [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 50(2): 655-672.
- [38] Huang Z K, Pitilakis K, Argyroudis S, et al. Selection of optimal intensity measures for fragility assessment of circular tunnels in soft soil deposits [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 145: 106724.
- [39] Zhong Z L, Shen Y Y, Zhao M, et al. Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 132: 106044.

(本文责编:赵霞)