

基于 IDA 方法的地铁车站结构抗震性能评价

钟紫蓝, 严智豪, 史跃波, 赵 密, 杜修力

(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: 针对目前大型地下结构抗震性能评价尚不完善, 提出了一种基于非线性增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 的多层多跨地下结构横断面地震易损性分析的方法. 选用典型三层三跨地铁车站建立土-结构二维整体分析有限元模型, 采取等效线性化模型模拟土体在地震作用下的剪切模量退化和阻尼增加特性, 纤维梁单元模拟多层地下结构在地震作用下的滞回特性. 基于 PEER 强震记录数据库的 21 条地表地震动峰值加速度中位值, 将其统一调幅到不同强度水平, 作为非线性 IDA 的输入地震动. 根据 IDA 结果的统计分析, 对于浅埋多层地下结构而言, 地表峰值加速度和峰值速度是有效且合适的地震动强度指标, 可以用来构建地下结构的易损性曲线. 通过与现有的矩形地下结构经验地震易损性曲线和数值地震易损性曲线比较, 验证了数值模拟得到的地震易损性曲线的有效性, 可以作为快速评价地下结构抗震性能的有效工具.

关键词: 地铁车站结构; 易损性曲线; 增量动力分析; 地震动强度参数; 抗震性能评价; 失效概率

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2021)07-0680-11

doi: 10.11936/bjutxb2021030011

Seismic Performance Evaluation of Station Structures Based on IDA Method

ZHONG Zilan, YAN Zhihao, SHI Yuebo, ZHAO Mi, DU Xiuli

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

Abstract: A new method for seismic vulnerability analysis of multi-story and multi-span underground structures based on nonlinear incremental dynamic analysis (IDA) was presented. A two-dimensional finite element model was established for a typical three-storey and three-span subway station by considering nonlinear soil-structure interaction. The equivalent linear model was adopted in the analysis to simulate the shear modulus degradation and damping characteristics of the soil under seismic excitations. The hysteretic behavior of the multistory underground structures under ground shaking was simulated by using fiber beam-column elements. A set of 21 ground motion records selected from the PEER strong earthquake record database were uniformly scaled based on the median peak ground acceleration to different intensity levels as the input ground motions at the bedrock of nonlinear IDA. It is found that the peak acceleration and peak velocity at the ground surface are efficient and appropriate intensity measures of the ground motions for the prediction of seismic response of the shallowly buried multistory underground structures and can be used to construct the seismic fragility curves of underground structures. Besides, the seismic fragility curves obtained from this numerical study were validated against the existing empirical and numerical seismic fragility functions of buried rectangular underground

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51978020); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1839201)

作者简介: 钟紫蓝(1986—), 男, 副研究员, 主要从事地下结构抗震方面的研究, E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn.

structures. The validated fragility curves can be used as an effective tool to quickly assess the seismic performance of the underground structures.

Key words: subway station structure; seismic fragility curves; incremental dynamic analysis (IDA); intensity measure; seismic performance assessment; failure probability

近些年来,以浅埋地铁车站及隧道为代表的大型地下结构在强震作用下发生不同程度破坏甚至倒塌,如:1995年日本阪神地震^[1]、1999年中国台湾集集地震^[2]、2008年中国汶川地震^[3]及2016年日本熊本地震^[4],这使得地下结构抗震安全性引起了世界范围的关注和重视。因此,近20年来国内外学者从数值模拟和模型试验方面针对以大开地铁车站为代表的地下结构的地震破坏机理以及抗震性能评价问题展开了大量研究^[5-7]。

增量动力分析(incremental dynamic analysis)方法,简称IDA方法,最早由Bertero^[8]于1977年提出,后来随着网络信息技术的发展,Vamvatsikos等^[9]促进了IDA方法的应用及发展。该方法可以考虑地震动不确定性的影响,反映地震动强度变化与结构体系响应之间的关系,清楚地将结构由损伤到破坏的全过程展示出来。IDA方法作为一种工程结构抗震性能分析方法目前已被美国联邦紧急事务管理部(federal emergency management agency, FEMA)^[10]应用到不同类型地面结构地震易损性分析中,用于建立结构不同损伤程度与地震动强度之间的概率关系^[11],它是基于性能的地震工程理论框架(performance based earthquake engineering, PBEE)中的一个重要组成部分,目前PBEE方法在地上结构抗震性能评估中日益普及,而在地下结构地震响应分析中确定性方法仍占主导地位。

近年来不少国内外学者围绕地下结构易损性分析展开了研究。American Lifeline Alliance(ALA)^[12]通过震害记录统计,对隧道的震害等级进行了分类,用经验方法建立了不同截面形式、不同施工质量下隧道结构的地震易损性曲线。Zhong等^[13]采用增量动力分析方法针对分段直埋输水管道节点连接处进行数值模拟,建立了埋地管线地震易损性曲线。Argyroudis等^[14]以沉积土层中圆形和方形横断面的浅埋隧道为例,考虑了地震动和土体动力特性的不确定性,以隧道横截面弯矩比为隧道地震损伤量化衡量指标,通过拟静力方法建立了隧道的易损性曲线。Osmi等^[15]通过Midas软件建立了三维土-隧道有限元模型,针对不同场地隧道进行了易损性分析,结果表明场地土层特性和输入的地震动特性对浅埋

隧道的抗震性能和响应有很大的影响。He等^[16]以大跨度地下框架结构为研究对象,提出了一种考虑竖向地震动作用的地下结构易损性分析流程,将竖向地震动和水平向地震动同时输入到模型中进行增量动力分析建立易损性曲线,得到了考虑竖向地震动作用时会使得地下结构更容易破坏的结论。Jiang等^[17]以两层双跨地铁车站结构为研究对象,分别选取远场地震动和有无脉冲的近场地震动输入模型中,进行增量动力分析,建立易损性曲线,分析结果表明远场地震动由于含低频率成分较多更容易使浅埋地下结构破坏。Argyroudis等^[18]考虑了衬砌腐蚀和土-结构相互作用对浅埋圆形隧道结构横断面损伤的影响,通过IDA方法建立了易损性曲线。Nguyen等^[19]以矩形明挖隧道结构为例,以弯矩比为结构地震损伤量化衡量指标,通过拟静力推覆分析方法建立了矩形明挖隧道结构的易损性曲线。崔臻等^[20]以大岗山水电工程地下洞室群为例,通过增量动力分析方法将不同幅值地震动输入到三维模型中计算,建立了大型地下洞室地震易损性曲线,为地下洞室群的抗震设计及地震风险决策提供参考。Zhong等^[21]以大开车站为研究对象,基于静力推覆分析划分结构损伤状态,量化损伤界限值,并通过对不同埋深处的地震动参数进行评价,优选出合适的地震动参数,建立了地震易损性曲线。

从以上国内外学者针对地下结构开展的易损性研究中可以看出,就目前而言,针对地下结构的地震易损性分析尚不完善且不充分,大多借鉴和沿用上结构地震易损性分析的框架和流程,且针对浅埋地铁车站的结构易损性分析研究较少。对此本文以典型三层三跨浅埋地铁车站结构为例,考虑地震动输入的不确定性,采用IDA方法对土-结构相互作用有限元模型进行大量的非线性动力时程计算,通过对IDA结果进行线性回归分析,建立了典型场地中三层三跨地下地铁车站结构的地震易损性曲线,并与国外学者的经验曲线及数值曲线结果进行了对比,验证其合理性,为快速评价同类型地铁车站的抗震性能提供参考。

1 地下结构易损性分析流程

本文提出的基于非线性 IDA 的地下结构横断面地震易损性分析流程如图 1 所示,主要包括地震动选取与处理、模型建立与验证、结构性能水准划分以及结构抗震性能评价 4 个部分。

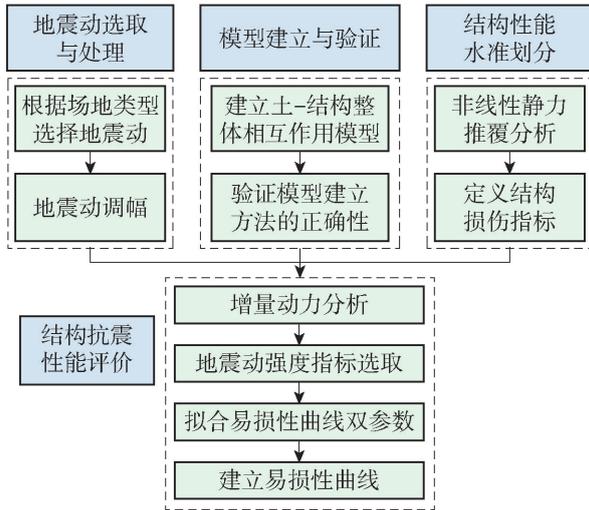


图 1 地下结构易损性分析的一般流程

Fig. 1 General procedure of seismic fragility analysis of underground structures

主要流程为通过有限元分析软件 ABAQUS 建立二维场地和地铁车站结构横断面整体模型并进行模型验证,确认分析方法的正确性,根据场地类型选取合适的地震动记录,将地震动调幅进行多次缩放,作为平面剪切波输入到模型中进行动力时程分析,对土-结构整体模型进行静力推覆分析来定义结构的极限状态和破坏状态,并通过相关性统计分析选取合理的地震动强度指标和结构损伤指标,最后根据国外学者推荐公式拟合易损性曲线双参数建立易损性曲线,并将本文的结果与国外学者进行对比分析,作出合理评价。

1.1 土体-结构相互作用有限元模型

本文所选用场地模型总厚为 60 m,等效剪切波速计算为 400 m/s,结构埋深为 10 m,场地主要由人工填土以及圆砾卵石组成,按照我国国家标准规范 (GB50909—2014)^[22]划分为 I 类场地。表 1 所示为场地土层参数。

本文以某三层双柱三跨框架岛式地铁车站结构为研究对象,计算该类大型地铁地下结构的非线性地震响应并评价其抗震性能。结构横断面尺寸如图 2 所示,其中顶板配筋率为 1.10%,上下层隔板配筋率为 1.70%,底板配筋率为 1.10%,侧墙配筋

表 1 I 类场地土层物理参数

Table 1 Type I site soil physical parameters

土层	土类	土层厚度/m	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	泊松比
1	人工填土	4.0	1 800	300	0.20
2	圆砾卵石 1	12.0	2 100	450	0.25
3	圆砾卵石 2	20.0	2 200	550	0.23
4	圆砾卵石 3	24.0	2 150	600	0.20

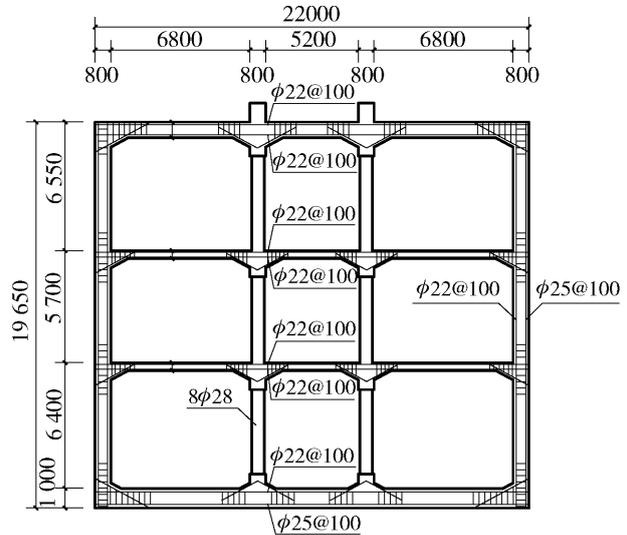


图 2 地铁车站结构横断面示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of cross-section of subway station structure (unit: mm)

率为 0.65%,柱配筋率为 1.00%,混凝土材料选用 C30 混凝土,钢筋材料选用 HPB235 型号。

在模型建立过程中,纤维梁单元 PQ-Fiber^[24] 被用来考虑结构的非线性,钢筋和混凝土本构分别采用随动硬化弹塑性本构 USteel02^[25] 模型和考虑抗拉强度的 UConcrete02^[26] 混凝土模型来模拟,如图 3(a)(b)所示。

由于中柱不像侧墙及底板等构件是连续的,而是以 9.12 m 为柱距均匀分布的,故将中柱按等刚度折减处理,折减中柱钢筋混凝土的密度和弹性模量,等效为适合平面应变问题的连续墙体,钢筋及混凝土材料参数如表 2 所示。

考虑到土体的非线性,本文采用了等效线性化方法,通过一维土层地震响应分析程序 EERA^[27] 可以计算得出不同深度土层在不同地震动作用下的等效剪切模量和等效阻尼比,模量衰减和阻尼曲线如图 4 所示^[28]。

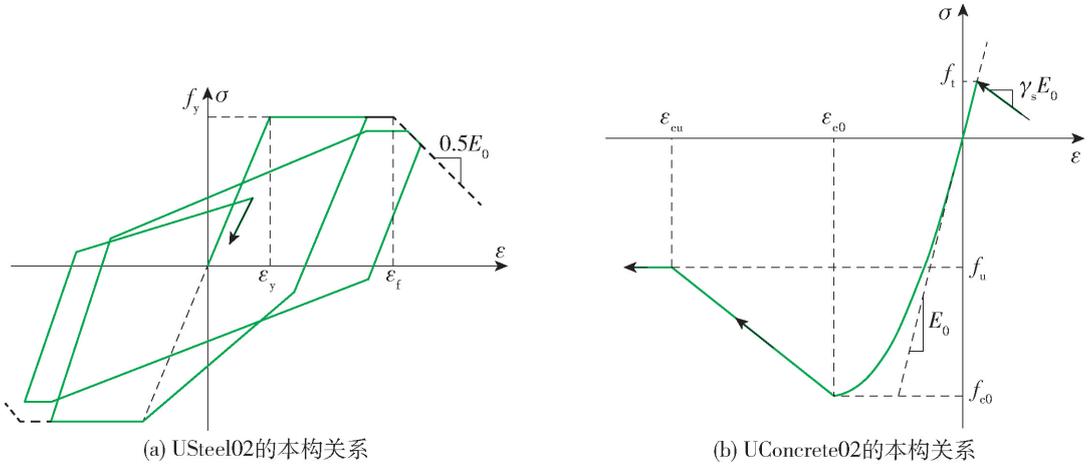


图3 钢筋和混凝土非线性本构关系

Fig. 3 Constitutive models for concrete and reinforcement

表2 钢筋及混凝土材料参数表

Table 2 Material parameters of steel rebar and concrete

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/GPa	泊松比	屈服强度 f_y/MPa	轴心受压强度 f_{c0}/MPa	轴心受拉 强度 f_t/MPa	极限受压 强度 f_u/MPa	峰值压 应变 ε_{c0}	极限压 应变 ε_{cu}
钢筋	7 800	200	0.30	235					
混凝土	2 500	30	0.15		14.3	2.01	12.2	0.001	0.003 8

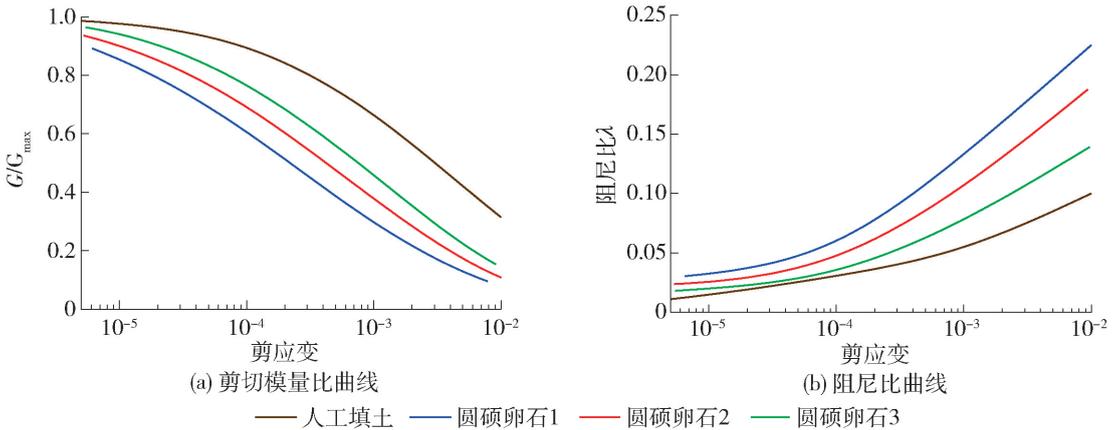


图4 场地岩土力学特性

Fig. 4 Geotechnical characteristics of the site

通过 EERA 进行一维土层地震响应分析所得的等效剪切模量和等效阻尼比代入式(1)及式(2)中计算,即可获得考虑土-结构相互作用有限元模型中所需的不同土层的等效弹性模量和 Rayleigh 阻尼系数^[29].

$$E_{eq} = 2G_{eq}(1 + \mu) \quad (1)$$

式中: E_{eq} 为相应土层的等效弹性模量; G_{eq} 为相应土层的等效剪切模量; μ 为相应土层的泊松比.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\xi_n}{\omega_i + \omega_j} \begin{bmatrix} \omega_i \cdot \omega_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: α 、 β 为 Rayleigh 阻尼系数; ξ_n 为在 EERA 中建

立自由场模型输入相应地震动计算得到的等效阻尼比; ω_i 、 ω_j 为在 ABAQUS 中建立自由场土柱模型进行模态分析得到的场地前 2 阶模态对应的频率.

图 5 所示为在 ABAQUS 和 EERA 中对表 1 中场地建模进行的自由场地震响应分析结果的对比情况,不难看出相应深度土层峰值加速度分布的对比结果良好,说明土体的等效线性化方法得到了很好的实现,可以应用于有限元模型计算中去.

为了消除地震动在截断边界处发生反射对地铁车站地震响应的影响,本研究所建立模型水平向宽度为结构宽度的 10 倍,并在土-结构相互作用整体

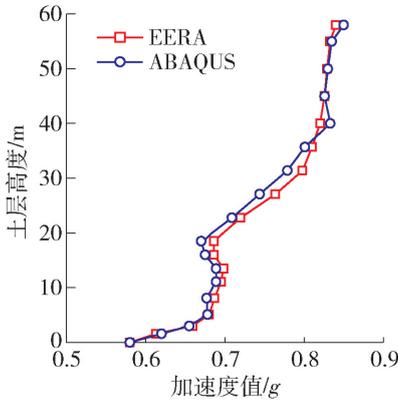


图5 一维场地地震响应对比结果

Fig. 5 Comparison results of one-dimensional site seismic response

模型的两侧边施加捆绑边界^[30]来考虑土体的水平运动;土体和结构接触的法向为硬接触,切向为摩擦接触,摩擦因数取为0.4;地震动加速度记录则作为平面剪切波从模型底部输入;图6所示为土-结构整体有限元模型示意图,图中3个参考点分别为地表(0 m)、结构中部(-20 m)及地震作用基准面(-60 m)处。

上述建模流程在笔者之前发表论文中已得到很好的验证^[21]。

1.2 地震动记录选取及调幅

国外学者 Vamvatsikos 等^[9,31]的研究表明,在

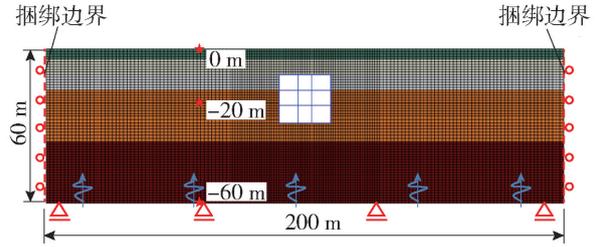


图6 土-结构整体有限元模型

Fig. 6 Integral finite element model of soil-structure interaction system

IDA 方法中采用20条地震动并将其幅值折半后作为工程基岩处地震输入,足够反映出地震动记录带来的不确定影响;FEMA P58-1^[23]也指出在进行非线性动力时程分析过程中,若所选用地震动的反应谱与目标反应谱拟合较好,每个强度等级下可采用7条地震动,当每个强度等级下采用11条及以上地震动时足以反映地震动的不确定性影响。综合以上分析,本文根据FEMA P695的推荐,选择出自于美国太平洋地震研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)强震记录数据库^[32]中21条水平向强震记录进行计算分析。

表3所示为地震动记录信息,地震加速度反应谱如图7所示,震级在6级到8级范围内(M_w 6.0 ~ M_w 8.0),震中距离为0 ~ 131.0 km。根据图7中反应谱的均值对该21条地震动进行了7次调幅,使得

表3 本文选用的地震动记录

Table 3 Ground motion records selected in this paper

序号	地震	台站	震中距/km	PGA/g
1	San Fernando	LA-Hollywood Stor FF	22.77	0.225
2	Friuli Italy-01	Tolmezzo	14.97	0.357
3	Imperial_Valley-06	Delta	22.03	0.236
4	Imperial_Valley-06	El Centro Array #11	12.56	0.367
5	Superstition Hills-02	El Centro Imp. Co. Cent	18.20	0.357
6	Superstition Hills-02	Poe Road (temp)	11.16	0.475
7	Loma Prieta	Capitola	8.65	0.511
8	Loma Prieta	Gilroy Array #3	12.23	0.559
9	Landers	Coolwater	19.74	0.284
10	Landers	Yermo Fire Station	23.62	0.245
11	Northridge-01	Beverly Hills-14145 Mulhol	9.44	0.443
12	Northridge-01	Canyon Country-W Lost Cany	11.39	0.404
13	Kobe Japan	Nishi-Akashi	7.08	0.483
14	Kobe Japan	Shin-Osaka	19.14	0.225
15	Kocaeli Turkey	Arcelik	10.56	0.210

续表 3

序号	地震	台站	震中距/km	PGA/g
16	Kocaeli Turkey	Duzce	131.17	0.312
17	Chi-Chi Taiwan	CHY101	9.94	0.34
18	Chi-Chi Taiwan	TCU045	26.00	0.473
19	Duzce Turkey	Bolu	12.02	0.74
20	Manjil Iran	Abbar	12.55	0.515
21	Hector Mine	Hector	10.35	0.265

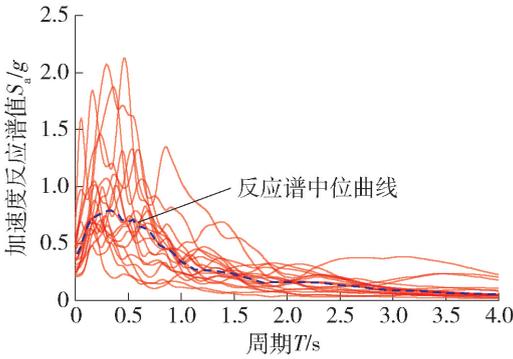


图7 地震动加速度反应谱曲线

Fig. 7 Spectral curves of earthquake acceleration response

峰值加速度在 0.05 g ~ 0.8 g, 输入到模型中进行增量动力分析。

2 地震动强度指标优化选取

在易损性分析研究中, 地震动强度指标 (intensity measure, IM) 的选取在一定程度上决定了易损性分析的结果是否可靠。便于提取、对比且常用的地震动强度指标有峰值加速度 PGA、峰值速度 PGV 以及峰值位移 PGD。故本文基于三层三跨地铁车站结构增量动力分析的结果, 分别对比了非自由场下不同深度处地震动参数 PGA、PGV 和 PGD 与结构损伤指标最大层间位移角 θ_{max} 之间的相关性。

$$\theta_{max} = \max(\theta_i), i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: θ_i 为非线性时程分析所得的地铁车站各楼层层间位移角峰值。

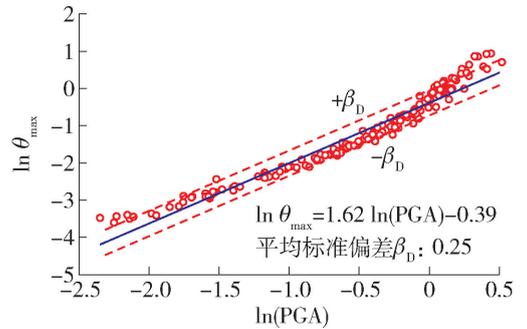
国外学者 Cornell 等^[33]指出: 结构损伤指标 DM 与地震动强度参数 IM 之间近似满足幂函数关系, 其关系式为

$$DM = \alpha \cdot IM^\beta \quad (4)$$

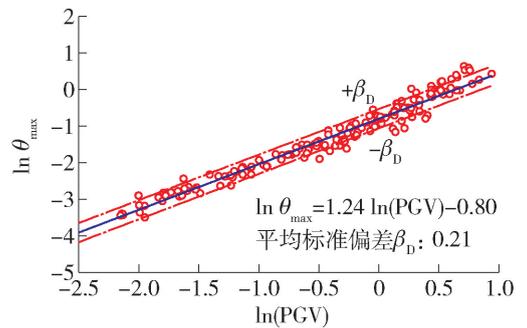
式中 α 和 β 是根据计算结果拟合得到的系数, 将式 (4) 左右两侧取对数, 则该式可通过最小二乘法对获得的 n 个离散点 (IM_i, DM_i) 进行一元线性回归分析^[34], 进而获得 α 和 β 的值以及 $\ln(IM)$ 与 $\ln(DM)$ 的经验拟合式, 拟合式的对数标准差为

$$\beta_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(DM) - (\ln \alpha + \beta \ln(IM))]^2}{n - 2}} \quad (5)$$

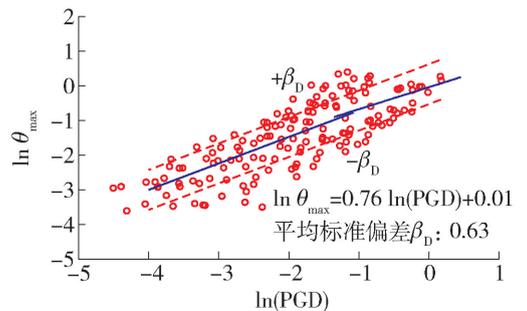
β_D 越小则说明相应的地震动强度参数与结构损伤指标 θ_{max} 之间的相关性越好, 越适合作为地震动强度指标。图 8 所示为地表处的 PGA、PGV 以及



(a) 地表处 PGA 相关性分析结果



(b) 地表处 PGV 相关性分析结果



(c) 地表处 PGD 相关性分析结果

图8 地表处不同 IM 的离散性

Fig. 8 Dispersion of IMs at ground surface

PGD 的相关性分析结果.

同理将图 6 中地表 (0 m)、结构中部 (-20 m) 及地震作用基准面 (-60 m) 处的地震动强度参数的平均标准偏差进行统计,得到了如图 9 所示的结果. 从图中可以看出,PGV 和 PGA 的离散性远小于 PGD 的离散性,地震作用基准面处的离散性 > 结构中部处的离散性 > 地表处的离散性. 同时,因为地铁车站受到周围岩土体的约束,地震作用下结构所受惯性力通常不起决定性作用,且按照弹性波动理论,PGV 与场地峰值应变成正比^[35],因此,计算结果也体现出将 PGV 作为地震动强度指标时,得到的计算结果离散性相对较小. 综合实际工程角度来看,为了方便后文地震易损性曲线与其他研究结果进行对比,本文选取地表处的 PGA 和 PGV 分别作为地震动强度指标.

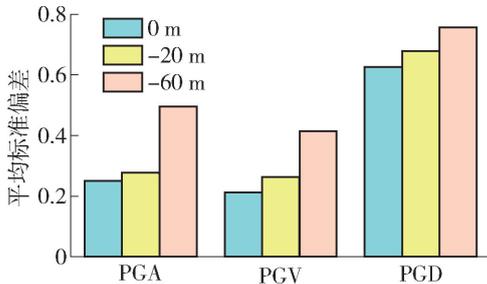


图 9 I 类场地地震动强度指标 IM 离散性对比

Fig. 9 Comparison of dispersion of different IMs in site class I

3 结构地震易损性曲线建立

3.1 结构极限状态定义

通常,浅埋地下结构由于受到周围土体的约束,在地震作用下受到高阶振型的影响较小,且在周围土体的作用下会发生剪切变形. 这与地上结构的地震响应规律和变形特点有很大不同,所以适用于地上结构分析的传统 Pushover 方法无法直接应用于地下结构抗震性能评价和性能水准划分中去.

刘晶波等^[36]在基于传统的地上结构 Pushover 法和地下结构反应加速度分析方法的基础上,考虑了地下结构变形特点和土-结构相互作用,进一步提出了地下结构整体式 Pushover 方法. 该方法具有概念清晰、计算简便、计算效率高、精度较好的优点,近年来在地下结构的抗震分析中也得到了广泛的应用. 杜修力等^[37]基于整体式 Pushover 方法,对 18 种考虑非线性土-结构相互作用的矩形地下结构进行了一系列静力推覆分析,统计量化出不同损伤状态下的阈值.

本文基于杜修力等^[37]的研究结果定义了三层三跨地下结构的损伤指标. 根据杜修力等^[37]对地下结构性能水准的定义,将损伤状态划分为:轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌 4 个阶段. 表 4 为三层三跨地铁车站结构中柱的性能水准划分及损伤状态的定义.

表 4 层间位移角损伤状态定义^[37]

Table 4 Definition of damage states based on interstory drift ratio

性能水准	功能状况	评价指标范围	评价指标中位值
基本完好	功能完好	$\theta_{\max} \leq 1/1223$	
轻微破坏	功能连续	$1/1223 < \theta_{\max} \leq 1/343$	0.20%
中等破坏	控制破坏与经济损失	$1/343 < \theta_{\max} \leq 1/161$	0.48%
严重破坏	保证安全	$1/161 < \theta_{\max} \leq 1/105$	0.87%
倒塌	功能完全丧失	$\theta_{\max} > 1/105$	1% ^①

①:倒塌状态的评价指标中位值按工程经验取为 1%.

3.2 易损性曲线建立

Zhong 等^[21]、Argyroudis 等^[14]国内外学者在地下结构抗震方面的研究表明,浅埋地下结构地震易损性曲线也近似服从双参数对数正态分布,可采用对数正态概率分布函数

$$P_f(d_s \geq d_{s_i} | S) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{\text{tot}}} \ln \left(\frac{S}{S_{\text{mi}}} \right) \right] \quad (6)$$

来描述. 式中: P_f 为结构在给定地震动强度 S 下的结构地震响应超过给定性能水准的概率; d_s 为在给

定地震动强度 S 下结构的地震响应; d_{s_i} 为给定的结构性能水准的临界值; Φ 为标准正态累积概率函数; S_{mi} 为结构处于某一性能水准下地震动强度指标 IM 的中间临界值; β_{tot} 为总的对数正态标准偏差. S_{mi} 和 β_{tot} 是建立易损性曲线过程中的关键参数, S_{mi} 的值越大曲线越低矮,代表结构越不容易受损, β_{tot} 越大曲线越平缓,代表所选用的指标对结构的影响程度越低.

总的对数正态标准偏差 β_{tot} 考虑了 2 个方面的

不确定因素的影响,假设它们之间是互相独立的,并且符合对数正态分布的随机变量,描述为

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_{DS}^2 + \beta_C^2 + \beta_D^2} \quad (7)$$

式中: β_{DS} 为考虑结构损伤状态阈值定义影响的偏差,地震灾害损失风险评估软件(HAZUS)^[38]建议该值取为0.4; β_C 为结构形式不确定性对承载力的影响,由于本文采用的结构形式是固定的,因此实际计算中忽略了此项系数; β_D 为在输入不同的地震动作用下得到的结构性能损伤的对数变量的平均标准偏差(可以由式(5)得出).

图10、11所示为I类场地 S_{mi} 的求解过程,通过对结构极限状态的定义求得结构的损伤指标临界值 d_{s_i} ,将 d_{s_i} 取对数代入DM与IM指标的线性关系式中即可求得 S_{mi} .将 S_{mi} 和 β_{tot} 的值代入式(6)中,计算出结构在不同强度水平的地震动作用下结构的损伤概率,便可得到分别以PGV和PGA为地震动强度指标的易损性曲线,如图12所示.

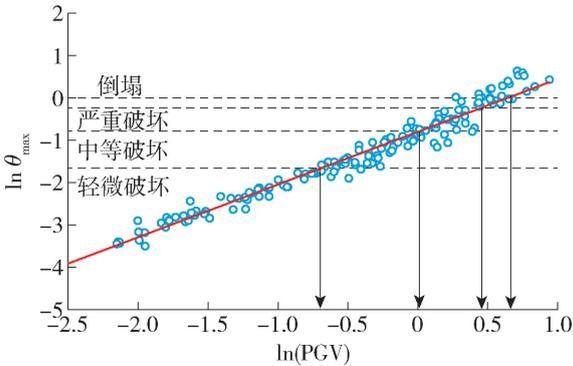


图10 结构最大层间位移角 θ_{max} -地表PGV线性拟合结果

Fig. 10 Linear regression of θ_{max} and PGV at ground surface

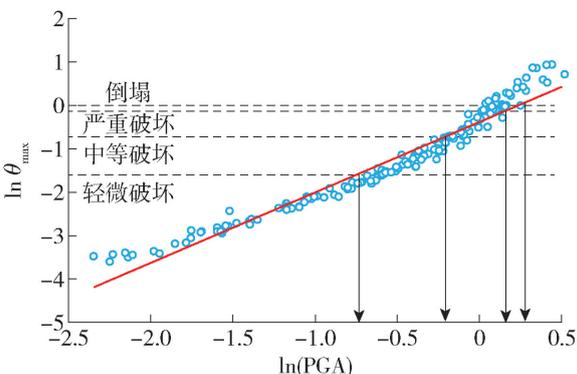
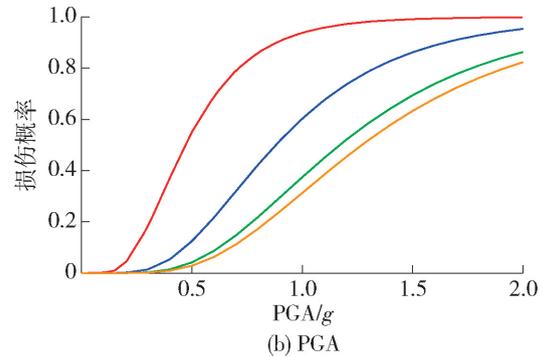
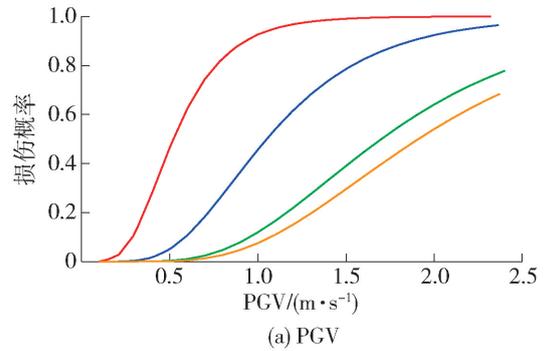


图11 结构最大层间位移角 θ_{max} -地表PGA线性拟合结果

Fig. 11 Linear regression of θ_{max} and PGA at ground surface



— 轻微破坏 — 中等破坏 — 严重破坏 — 倒塌

图12 I类场地下结构地震易损性曲线

Fig. 12 Structure seismic fragilitycurve in site class I

从图12中可以很直观地看出结构在给定地震动强度下发生不同程度损伤的概率.对于特定I类场地而言,对应超越概率为50%的4种损伤情况的PGV值分别为0.52、1.05、1.70和1.91 m/s,相应的PGA值分别是0.47 g、0.88 g、1.17 g和1.27 g.

3.3 数值分析曲线与经验曲线的对比

ALA对全球隧道进行了震害调查统计,将隧道分为施工质量良好和施工质量中等及中等以下的2类,并绘制出了这2类隧道的经验易损性曲线,这一经验曲线是基于实际工程震害统计得出的,所以对地下结构易损性研究具有很大的参考价值.近年来Argyroudis等^[18]通过拟静力方法,对不同场地及不同截面形式的地下隧道结构进行了易损性分析,建立了数值分析易损性曲线,可以为本文分析结果做参考.

为了验证数值分析易损性曲线是否有效合理,本文选取了ALA中施工质量良好的经验易损性曲线,以及国外两位学者研究与本文相似的场地和结构形状尺寸的数值分析曲线进行了对比.由于ALA中对隧道严重破坏和倒塌时的统计数据库不充分,Argyroudis等^[18]研究结果中没有建立倒塌易损性曲线,因此本文仅将分析结果与轻微和中等破坏时的经验曲线进行了对比,且未对比倒塌破坏时数值分析曲线的结果,如图13所示.

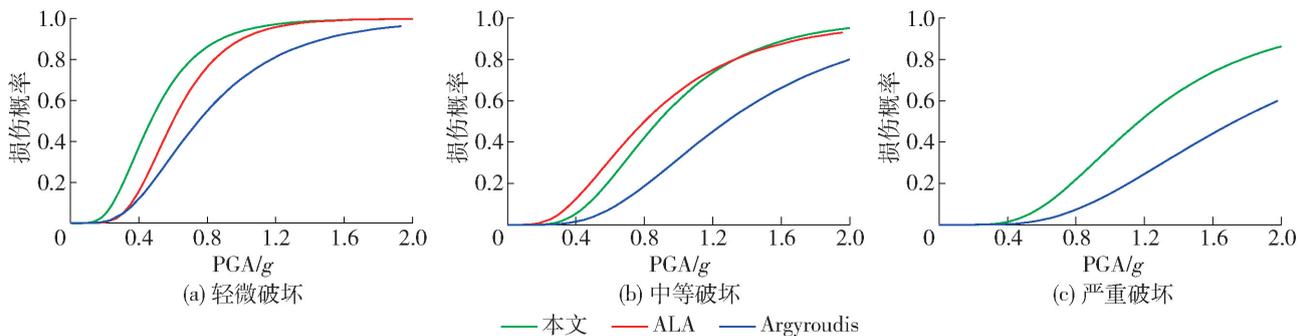


图 13 地震易损性曲线对比

Fig. 13 Comparison of seismic fragility curves

从图 13 中可以看出,对于 I 类场地而言,本文轻微破坏的易损性曲线与 ALA 的结果基本吻合,中等破坏的易损性曲线位于 ALA 和 Argyroudis 等^[18]的易损性曲线之间,即同等地震动强度下,对同一结构用 3 种易损性曲线进行抗震性能评价时,ALA 评价的损伤概率略 > 本文评价的结构损伤概率 > Argyroudis 等^[18]评价的损伤概率。

由于 ALA 的经验易损性曲线是根据震害统计得来的,而震害记录多是记录的软弱场地的结构损伤情况,因此在这里经验曲线与数值分析结果会相差较大。本文的地铁车站结构通过动力方法获取结构最大层间位移角来量化结构损伤,这与 Argyroudis

文中的隧道结构通过拟静力方法获取弯矩比来量化结构损伤是不同的,本文所采用的具有一定统计意义的结构变形作为地下结构地震损伤指标相较于已有的基于力的指标更为合理有效。而且,地铁车站结构存在中柱这一薄弱构件,在相似场地和类似结构横断面尺寸的条件下,地铁车站结构相较于隧道结构而言应更容易发生破坏,这也验证了本文所得到的结果具有一定的参考价值。

根据本文得到的 I 类场地的结构地震易损性曲线,可以针对三层三跨地铁车站结构预测出结构在地震动作用下的损伤概率与地震动强度大小之间的关系,用于地铁车站的地震风险评估,如表 5 所示。

表 5 结构在不同性能水准下的损伤概率

Table 5 Failure probability of structures at different performance levels

地震动强度	PGA/ g	场地类型	损伤情况				
			基本完好/%	轻微破坏/%	中等破坏/%	严重破坏/%	倒塌/%
7 度设防地震	0.15	I	99.01	0.97	0.02	0.00	0.00
8 度设防地震	0.30	I	82.02	16.57	1.13	0.12	0.16
9 度设防地震	0.40	I	62.90	31.72	3.95	0.51	0.92

4 结论

本文选择我国最为常见的地铁车站结构形式之一——三层三跨浅埋矩形地下框架结构作为研究对象,考虑结构及其周围土体在地震作用下的非线性特性,基于 IDA 方法优选出分析结果离散性较小的浅埋地下结构地震动强度指标,并建立了典型场地条件下三层三跨地铁车站结构地震易损性曲线。得到主要结论如下:

1) 通过对比基于历史震害统计的地下结构经验地震易损性曲线及其他学者基于数值模拟分析建立的易损性曲线,验证了本文所建立的地铁车站结

构的地震易损性分析的有效性,可为同类型地下结构抗震性能快速评价提供必要参考。

2) 以不同埋深处的地震动峰值参数为地震动强度指标时所给出分析结果的离散性差异显著,地表处的 PGV 和 PGA 较适宜作为地震动强度指标。

参考文献:

- [1] 杜修力,李洋,许成顺,等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223-236.
DU X L, LI Y, XU C S, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake [J]. China Journal of

- Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236. (in Chinese)
- [2] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 133-150.
- [3] WANG Z Z, GAO B, JIANG Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan Earthquake [J]. Science China—Technological Sciences, 2009, 52(2): 546-558.
- [4] ZHANG X, JIANG Y, SUGIMOTO S. Seismic damage assessment of mountain tunnel: a case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71(71): 138-148.
- [5] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. Soils and Foundation, 1996 (Special Issue): 283-300.
- [6] HUO H, BOBET A, FERNANDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai station [J]. Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [7] 杜修力, 马超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 53-62, 69.
DU X L, MA C, LU D C, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 53-62, 69. (in Chinese)
- [8] BERTERO V V. Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments [J]. Structural Engineering and Structural Mechanics, 1977, 53(1): 29-79.
- [9] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [10] FEMA. FEMA 350, recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings [R]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [11] 吕大刚, 李晓鹏, 王光远. 基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(2): 107-114.
LÜ D G, LI X P, WANG G Y. Global seismic fragility analysis of structures based on reliability and performance [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(2): 107-114. (in Chinese)
- [12] American Lifelines Alliance. Seismic fragility formulations for water systems, part 1-guideline [M]. Reston: ASCEFEMA, 2001: 1-96.
- [13] ZHONG Z, FILIATRAULT A, AREF A. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(5): 811-829.
- [14] ARGROUDIS S A, PITIKALIS K D. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2012, 35: 1-12.
- [15] OSMI S K, AHMAD S M. Seismic fragility curves for shallow circular tunnels under different soil conditions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2016, 10(10): 1351-1357.
- [16] HE Z, CHEN Q. Vertical seismic effect on the seismic fragility of large-space underground structures [J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 9650294.
- [17] JIANG J W, EI NAGGAR H M, 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.
- [18] ARGYROUDIS S, TSINIDIS 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.
- [19] NGUYEN D D, PARK D, SHAMSHER S, et al. Seismic vulnerability assessment of rectangular cut and cover subway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 247-261.
- [20] 崔臻, 盛谦, 冷先伦, 等. 基于增量动力分析的大型地下洞室群性能化地震动力稳定性评估 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 703-712.
CUI Z, SHENG Q, LENG X L, et al. Performance-based seismic stability assessment of large underground cavern group with incremental [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 703-712. (in Chinese)
- [21] ZHONG Z, SHEN 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.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [23] FEMA. Seismic performance assessment of buildings volume 1-methodology [R]. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [24] 曲哲, 叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型 [J]. 工程力学, 2011, 28(6):

- 45-51.
- QU Z, YE L P. Strength deterioration model based on effective hysteretic energy dissipation for RC members under cyclic loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 45-51. (in Chinese)
- [25] FILIPPOU F C, POPOV E P, BERTERO V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints[R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1983.
- [26] MCKENNA F. Object oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1997.
- [27] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA-a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses[R]. South California: University of Southern California, 2000.
- [28] 杜修力, 袁雪纯, 黄景琦, 等. 典型土层场地随机地震反应规律分析[J]. *震灾防御技术*, 2017, 12(3): 574-588.
- DU X L, YUAN X C, HUANG J Q, et al. Analysis of stochastic seismic response in typical soil sites [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(3): 574-588. (in Chinese)
- [29] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2155-2163.
- DU X L, XU Z G, XU C S, et al. Time-history analysis method for soil-underground structure system based on equivalent linear method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2155-2162. (in Chinese)
- [30] TSINIDIS G, PITILAKIS K, TRIKALIOTIA D. Numerical simulation of round robin numerical test on tunnels using a simplified kinematic hardening model[J]. *Acta Geotechnica*, 2013, 9(4): 641-659.
- [31] VAMVATSIKOS D, FRAGIADAKIS M. Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(2): 141-163.
- [32] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [DB/OL]. [2021-02-01]. <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>.
- [33] 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.
- [34] 钟紫蓝, 申轶尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(3): 486-494.
- ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHEN L B, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures[J]. *China Civil Engineering*, 2020, 42(3): 486-494. (in Chinese)
- [35] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock [C] // *Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*. New Mexico: University of New Mexico Press, 1968: 7-26.
- [36] 刘晶波, 刘祥庆, 李彬. 地下结构抗震分析与设计的Pushover分析方法[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(4): 73-80.
- LIU J B, LIU X Q, LI B. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures [J]. *China Civil Engineering*, 2008, 41(4): 73-80. (in Chinese)
- [37] 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)
- [38] HAZUS-MHMR1. Multi-hazard loss estimation model: manual advanced engineering building module methodology-earthquake-technical and user's [R]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency, 2003.

(责任编辑 张 蕾)