

DOI: 10.11779/CJGE20211498

浅埋地铁车站地下框架结构抗震设计的最优地震动强度指标

蒋家卫^{1,2}, 许成顺^{*3}, 杜修力³, 陈国兴^{1,2}, 许紫刚⁴

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211816; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 211816; 3. 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, 4. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘 要: 本文旨在研究浅埋地铁车站地下框架结构概率地震需求分析中的最优地震动强度指标。基于 ABAQUS/Standard 软件平台, 建立地下框架结构土-结构相互作用分析的二维模型, 采用非线性动力时程分析方法获得了 3 种断面的地铁车站框架结构在 22 条远场地震动记录激励下的非线性地震反应数据。以峰值层间位移角作为结构损伤参数, 基于效率性、实用性、有益性及充分性对 15 种地震动强度指标进行了检验分析。结果表明: PGA 最适合作为地震动强度指标进行浅埋地铁车站地下框架结构的概率地震需求分析, 速度反应谱与 PGV 可作为备选强度指标; PGD、位移均方根、速度平方积分, 与位移平方积分等强度指标均未能满足充分性检验, 不适用于浅埋地铁车站地下框架结构概率地震需求分析。上述结论可对指导浅埋地下结构基于性能的抗震设计、发展和完善现有地下结构概率地震需求模型地震动强度指标的确定方法提供有价值的参考。

关键词: 地震动强度指标; 地铁车站; 地下结构; 动力时程分析

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)02-0318-09

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

Optimal index of earthquake intensity measures for seismic design of underground frame structure of shallow-buried subway station

JIANG Jiawei^{1,2}, XU Chengshun³, DU Xiuli³, CHEN Guoxing^{1,2}, XU Zigang⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech. University, Nanjing 211816, China; 2. Civil Engineering & Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 211816, China; 3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The optimal index of earthquake intensity measures required in the probabilistic seismic demand model for seismic design of the underground frame structure of shallow-buried subway station is studied. Based on the ABAQUS/Standard platform, the two-dimension model for an underground frame structure is established. The seismic responses of three subway station cross-sections are obtained by using the nonlinear dynamic time-history analysis in term of 22 far-field earthquake records. The peaks of inter-story drift ratios are obtained and selected as the structural damage measure, and 15 candidate intensity measures (IMs) are examined based on the characteristics of efficiency, practicality, proficiency and sufficiency. The results show that PGA is an optimal IM for the probabilistic seismic demand model for the underground frame structure of shallow-buried subway station, whereas the PGV or the velocity response spectrum is an alternative IM. However, the PGD, root-square of displacement, root-mean-square of velocity and root-mean-square of displacement are failed in the tests on the sufficiency, in which they are not appropriate to the probabilistic seismic demand analysis for the underground frame structure of shallow-buried subway station. The findings may provide a helpful guide to the performance-based seismic design of underground structure and to the developing and improving of the determination method of optimal IMs of the existing probabilistic seismic demand model for shallow-buried underground structure.

Key words: earthquake intensity measure; subway station; underground frame structure; dynamical time-history analysis

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305); 国家自然科学基金联合基金项目(U1839201); 国家自然科学基金青年项目(52108453); 江西省自然科学基金青年项目(20212BAB214014)
收稿日期: 2021-12-25
*通信作者(E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn)

0 引言

基于性能的抗震设计代表了未来结构抗震研究发展的主要方向^[1], 作为基于性能抗震设计的重要组成部分, 概率地震需求分析 (PSDA, probabilistic seismic demand analysis)^[2]主要求解基于特定地震动强度指标 (IM, intensity measure) 的结构或构件的地震响应 (D) 超越某一特定值 (d) 的概率 (P_d), 如式 (1) 所示:

$$P_d = P[D \geq d | \text{IM}] \quad (1)$$

地震动强度指标的选择直接影响不确定性因素在结构概率地震需求分析中的传播。因此, 学者们关于如何确定最优 IM 指标的问题开展了一系列的研究^[3-13]。Padgett 等^[5]建议在典型多跨度钢结构桥梁的概率地震需求分析中采用峰值加速度 PGA 或加速度反应谱强度 S_a 作为 IM。Guo 等^[6]对斜拉桥结构在不同场地下的地震强度指标进行了分析, 研究认为峰值速度 PGV 最适宜作为 IM 进行地震风险评估分析。Khosravikia 等^[7]在原有有效性、实用性的评价标准基础上, 提出了一种改进的 IM 检验标准, 并基于改进后的标准对不同 IM 行了研究, 结果表明与速度相关的 IM 如 PGV 更适合于桥梁结构的概率地震需求分析。Pejovic 等^[8]推荐在高层钢筋混凝土框架结构的概率地震需求分析中采用包含频谱特性或速度相关的 IM。周颖等^[9]建议采用考虑三阶振型的加速度反应谱作为 IM 建立高层结构的地震易损性曲线。Du 等^[10]在单自由度建筑结构的地震动强度指标研究中指出, 选择加速度反应谱作为 IM 进行概率地震需求分析效果最佳。Huang^[11]研究了不同埋深下隧道地震需求的最优地震强度指标, 结果表明: PGA 适用于浅埋隧道, 而 PGV 则适用于深埋隧道。张成明等^[12]提出以持续最大加速度为圆形隧道损伤评价的地震强度指标。赵密等^[13]对地下结构最优地震动强度指标随埋深的变化规律进行了研究, 结果表明, 随着埋深的增加, 结构的最优地震动强度指标也会发生显著改变。目前, 有关适用于浅埋地下框架结构的地震动强度指标在地震易损性分析中的选取尚未形成共识。而现有研究表明^[14], 不同类型结构地震需求的地震动强度指标最优选择存有显著差异。

综上所述, 至今未有城市地铁车站地下结构概率地震需求分析的最优地震动强度指标研究的公开报道。本文以浅埋 (定义埋深为 0~7 m)^[15]地铁车站地下框架结构为研究对象, 通过数值分析, 评估了 15 种地震动强度指标在地铁车站地下框架结构 PSDA 中的适用性。

1 地震强度指标评价标准

根据 Cornell 等^[16]的研究, 结构在多条地震动激励下的响应数据样本服从对数正态分布, 也即, 描述结构地震响应的工程需求参数 (EDP: engineering demand parameter) 均值与地震动强度指标之间存有以下线性关系:

$$\ln S_D = b \cdot \ln \text{IM} + \ln a \quad (2)$$

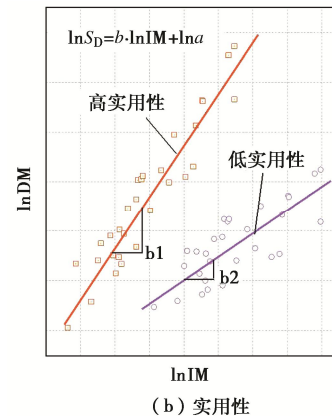
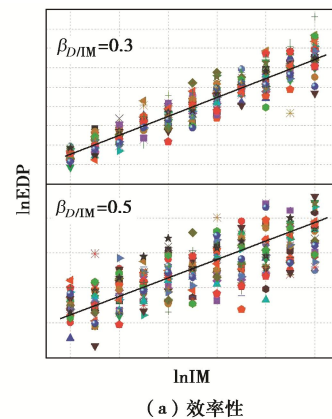
式中, S_D 为结构地震响应 EDP 的估计均值, a , b 为线性回归系数。

因此, 可采用高斯分布函数进一步对式 (1) 的概率地震需求模型函数表达为

$$P(D > d | \text{IM}) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln d - \ln S_D}{\beta_{D|\text{IM}}} \right) \quad (3)$$

式中, Φ 为标准正态累计分布函数, $\beta_{D|\text{IM}}$ 为结构地震响应的对数标准差。

结构概率地震需求模型的建立首要任务是确定合适的地震动强度指标。本文基于效率性、实用性、有益性及充分性对地下结构地震需求的最优 IM 进行分析^[5], 相关的评价标准见图 1。基于 EDP-IM 数据样本的自然对数标准差 $\beta_{D|\text{IM}}$ 来检验候选 IM 的效率性; 采用式 (2) 中回归系数 b 来衡量 IM 的实用性; 本文在判断 IM 是否具备充分性时, 首先提取 EDP 的残差 $\varepsilon | \text{IM}$, 然后对残差与其它地震动信息参数所组成的样本进行独立性检验。



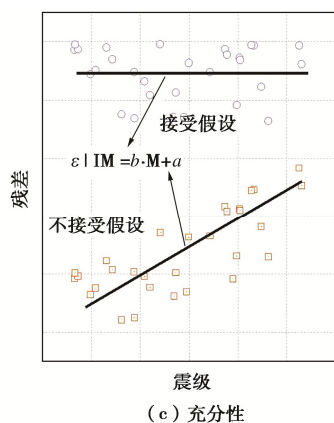


图 1 强度指标效率性对比示例

Fig. 1 Example of relative efficiency of intensity measures

概率地震需求分析中地震动参数的优选不仅与地震动记录本身信息相关，也与所选结构的 EDP 有关。在基于性能的结构抗震设计中，所选的 EDP 一般应与结构的震后破坏状态紧密相关，该 EDP 也被定义为损伤指标（DM，damage measures）。基于大开地铁车站的地震破坏机理与相关地下结构抗震分析研究表明^[17-19]，峰值层间位移角与结构的破坏状态密切相关。杜修力等^[20]、Du 等^[21]以层间位移角（IDR：inter-story drift ratio）量化地下框架结构的抗震性能指标。因此，本文选用层间位移角作为结构损伤指标进行地铁车站地下结构概率地震需求分析。本文选取 15 种常见地震动强度参数作为备选指标，所选的 IMs 可区分为 4 个类型：结构频谱特性相关，加速度相关，速度相关，位移相关，见表 1，IMs 的具体含义见文献[4]。

由于缺乏历史震害数据，通常基于数值分析获取概率地震需求模型中所需的地震响应数据样本，其中，以增量动力分析（IDA，incremental dynamic analysis）^[22-26]方法的应用最为广泛，其核心思想是输入幅值逐步增大的地震动记录对结构进行非线性动力时程分析，以获得结构从弹性至弹塑性整个过程的地震响应状态。

2 计算模型

2.1 地铁车站工程参数

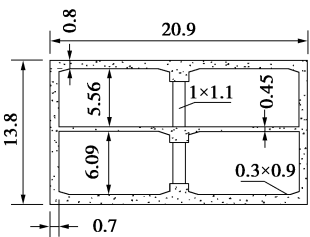
3 种典型地铁车站地下框架结构横断面如图 2 所示。断面 A 为两层两跨车站，顶板埋深 2 m，结构主体混凝土等级为 C40，中柱混凝土等级为 C50，其主钢筋型号为 HRB335；断面 B 为两层三跨车站，顶板埋深 3 m，结构主体混凝土等级为 C40，中柱混凝土等级为 C50，其主钢筋型号为 HRB335；断面 C 为三层三跨车站，顶板埋深 2.5 m，结构主体与中柱混凝土等级均为 C50，其主钢筋型号为 HRB335。断面 A、

表 1 不同地震动强度指标的表达式

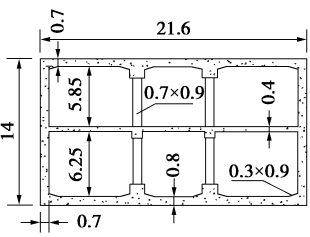
Table 1 Equations for various ground motion intensity measures

类别	名称	表达式
加速度 相关	PGA	$\max a(t) $
	均方加速度 a_{rms}	$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt}$
	加速度平方积分 a_{sq}	$a_{\text{sq}} = \int_0^{t_f} a^2(t) dt$
	Arias 强度 I_a	$\frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt$
	特征强度 I_e	$(a_{\text{rms}})^{3/2} \cdot \sqrt{t_{\text{tot}}}$
速度 相关	PGV	$\max v(t) $
	均方根速度 v_{rms}	$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt}$
	速度平方积分 v_{sq}	$v_{\text{sq}} = \int_0^{t_f} v^2(t) dt$
	Fajfar 强度 I_F	$I_F = \text{PGV} v_d^{0.25}$
位移 相关	PGD	$\max d(t) $
	均方根位移 d_{rms}	$d_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} d^2(t) dt}$
	位移平方积分 d_{sq}	$d_{\text{sq}} = \int_0^{t_f} d^2(t) dt$
周期谱 相关	加速度反应谱 $S_a(T_n)$	$S_a(T=0.2, \xi=0.05)$
	速度反应谱 $S_v(T_n)$	$S_v(T=0.2, \xi=0.05)$
	位移反应谱 $S_d(T_n)$	$S_d(T=0.2, \xi=0.05)$

断面 B 以及断面 C 所在场地土的基本物理力学性质见表 2，动剪模量衰减比-应变 $G/G_{\text{max}}-\gamma$ 与阻尼比-应变 $\lambda-\gamma$ 曲线如图 3 所示。



(a) 断面A



(b) 断面B

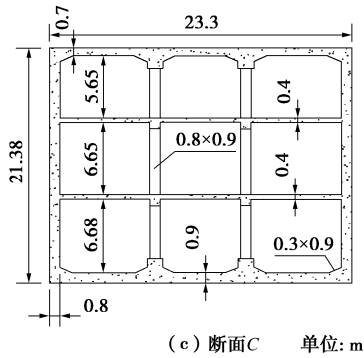


图 2 典型地铁车站断面及尺寸

Fig. 2 Cross-sections and sizes of typical subway station

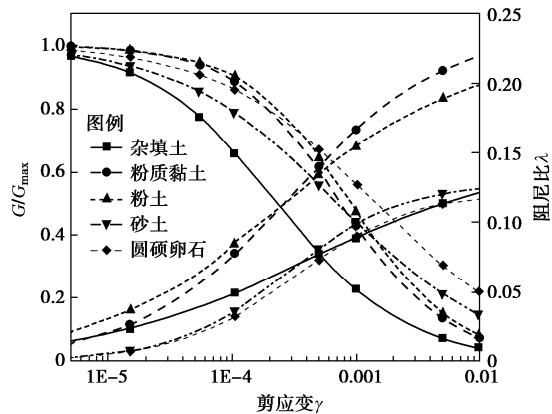


图 3 代表性土的 G/G_{\max} - γ 与 λ - γ 曲线

Fig. 3 G/G_{\max} - γ and λ - γ curves of typical soils

2.2 有限元模型

以断面 A 为例, 基于 ABAQUS/Standard 软件平台建立二维有限元数值分析模型, 如图 4 所示。模型长度取车站横断面宽度 5 倍或以上, 模型深度取至基岩面。土体模型的网格划分原则上保证单元尺寸小于地震波长的 1/10^[27], 全局尺寸取 0.5 m, 结构附近土体单元网格尺寸为 0.25 m, 结构与钢筋的单元网格尺寸均为 0.25 m。分别选用实体单元模拟土体、

梁单元模拟混凝土结构、桁架单元模拟钢筋, 钢筋通过关键字 *Rebar 与结构进行绑定。为考虑土-结构相互作用, 结构与土体接触面的径向采用硬接触, 切向采用摩擦接触, 其摩擦系数取 0.4^[28-30]。模型底部, 固定两侧采用已广泛应用于地下结构数值分析的捆绑边界^[17, 31-32], 即对同一高度的侧边节点进行运动耦合约束, 但保持其在水平与垂直方向上的自由度, 以模拟土体在地震动荷载作用下的剪切运动。本文采用振动法进行地震动记录的输入, 模型荷载主要分位两步: 第一步, 为重力荷载, 第二步为动力荷载, 值得注意的是, 所有模型均进行了地应力平衡, 详细方法见文献^[20]。

地下结构所受的地震作用具有循环往复的特性。因此, 本文选择混凝土塑性损伤本构模型^[18, 33]考虑混凝土结构的动力学行为。该模型引入标量损伤参数来模拟材料的各向同性损伤, 损伤系数直接与材料的退化刚度相关。选用理想弹塑性本构^[34]模拟钢筋; 采用基于 Davidenkov 骨架曲线的 non-Masing 滞回本构模型描述岩土的动力非线性滞回特性^[35, 36]。

参考报告 FEMA-P695^[37], 本文选取 22 条远场地震动记录 (44 条加速度时程曲线) 作为本文非线性动力时程分析的输入荷载。如图 5 所示, 对输入地震动记录进行调幅, 基于 IDA 方法, 获取不同强度的该地震动记录作用下的地下结构非线性响应数据, 步骤如下:

(1) 选取拟输入的地震动记录 $i(i=1)$, 基于 PGA 调幅至 $a_{p1} = 0.05g$, 进行土-地下结构体系非线性动力时程分析, 获取峰值层间位移角。

(2) 若峰值层间位移角大于地下结构的倒塌极限, 返回 (1), 对下一条拟输入的地震动记录 ($i = i+1$) 重复 (1) 的过程; 当 $i=44$ 时, 即计算完成。若峰值层间位移角小于地下结构的倒塌极限, 进入 (3)。

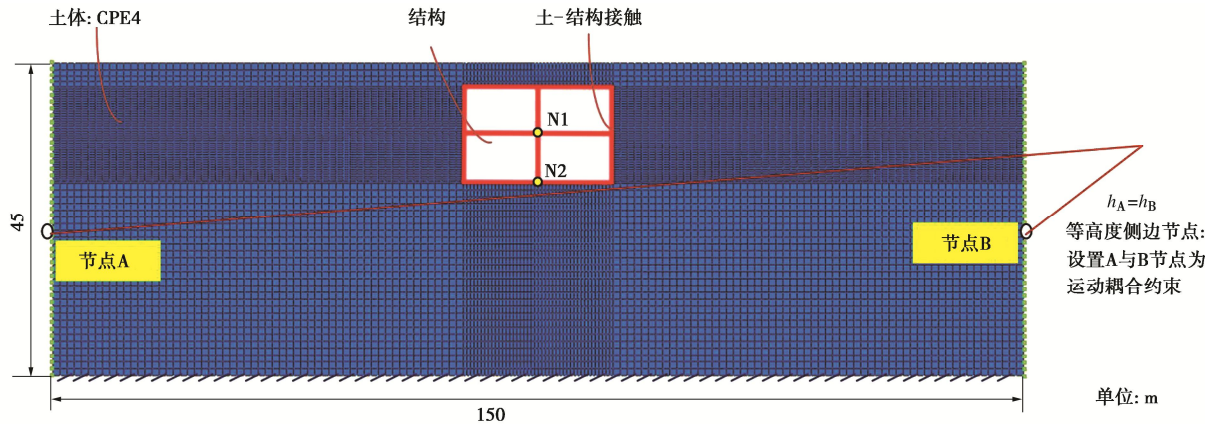


图 4 有限元分析模型示意图

Fig. 4 Diagram of finite element analysis model

表 2 土层物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

编号	岩土性质			厚度/m			密度/(kg·m ⁻³)			剪切波速/(m·s ⁻¹)			泊松比		
断面 类型	断面 A	断面 B	断面 C	断面 A	断面 B	断面 C	断面 A	断面 B	断面 C	断面 A	断面 B	断面 C	断面 A	断面 B	断面 C
1	填土	填土	填土	2	2.5	2.0	1700	1700	1800	147	169	168	0.35	0.29	0.35
2	粉土	粉土	粉土	6	2.0	4.2	2020	2020	2030	190	213	212	0.35	0.31	0.35
3	黏土	黏土	黏土	7	7.0	5.6	2000	1930	1950	193	231	224	0.36	0.29	0.35
4	砂土	粉土	粉土	2	4.0	2.2	2050	2020	2060	274	246	242	0.33	0.31	0.35
5	黏土	黏土	细砂	10	1.5	2.5	2020	1960	2020	300	253	267	0.36	0.29	0.32
6	砂土	粉土	粉土	3	2.0	1.6	2050	2080	2060	328	289	243	0.33	0.31	0.35
7	黏土	砂土	黏土	2	8.0	1.5	1990	2020	2030	331	352	250	0.36	0.26	0.36
8	砂土	砂土	黏土	6	14.0	5.8	2050	2020	1980	368	396	273	0.33	0.26	0.36
9	粉土	基岩	粉土	7	—	136.0	2000	2500	2060	382	—	273	0.35	—	0.35
10	基岩		黏土	—	—	2.6	2500	—	1980	—	—	291	—	—	0.36

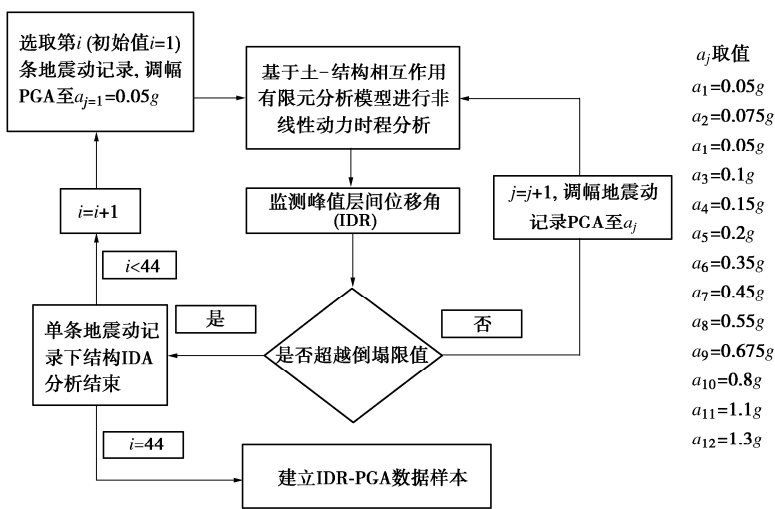


图 5 IDA 方法的实施流程

Fig. 5 Implementation process of IDA method

(3) 令 $j = j+1$, 基于 PGA 调幅至 a_{j+1} , 例如, $a_{j+1}=0.1g$, 再次进行土-地下结构体系非线性动力时程分析, 并获取结构峰值层间位移角, 返回 (2)。

3 结果分析与讨论

3.1 效率性分析结果

表 3 统计了车站断面 A、断面 B 和断面 C 基于不同 IM 指标下 IDR 的标准差。可以看出, 标准差值分布在 0.3~1.0, 多数在 0.5 左右, 其中, 基于 PGA 指标的标准差值最小, 断面 A 为 0.351, 断面 B 为 0.339, 断面 C 为 0.352。由此说明以 PGA 作为 IM 指标进行结构概率地震需求分析的效率性最好。基于加速度平方积分指标的标准差值仅仅大于基于 PGA 指标的标

准差值。这表明以加速度平方积分作为 IM 指标进行概率地震需求分析的效率性, 虽然差于 PGA 指标, 但明显优于其它 IM 指标。然而, 基于 PGD、均方根位移、位移平方积分和位移反应谱等指标计算的标准差值较大, 均超过了 0.7, 也即上述 4 种 IM 指标的效率性不太理想。此外, 基于与加速度相关的 IM 指标计算的标准差要普遍小于其它 3 种类型的 IM 指标 (表 1), 且基于与位移相关的 IM 指标计算的标准差值最大。上述结果表明: 采用加速度相关的 IM 指标, 一般都可以保证较好的效率性, 且以基于 PGA 指标的效率性最好。进一步观察表 4 可以发现, 断面 A、断面 B 以及断面 C 的效率性评价结果无明显区别, 这说明地铁车站断面类型对 IM 的效率性评价结果的影响甚微。

表 3 基于效率性、实用性以及有益性的分析结果
Table 3 Analysis results based on efficiency, practicality and proficiency

IM	断面 A			断面 B			断面 C		
	标准差	系数 b	系数 ζ	标准差	系数 b	系数 ζ	标准差	系数 b	系数 ζ
PGA	0.351	1.063	0.330	0.339	1.027	0.330	0.352	1.089	0.323
PGV	0.405	1.007	0.402	0.416	0.953	0.437	0.428	1.038	0.412
PGD	0.721	0.637	1.132	0.714	0.598	1.194	0.764	0.695	1.099
a_{rms}	0.507	0.899	0.564	0.473	0.875	0.541	0.533	0.945	0.564
a_{sq}	0.391	0.513	0.762	0.370	0.494	0.749	0.396	0.530	0.747
I_a	0.426	0.494	0.862	0.379	0.486	0.780	0.433	0.510	0.849
I_c	0.559	0.560	0.998	0.503	0.559	0.900	0.574	0.588	0.976
v_{rms}	0.616	0.768	0.802	0.610	0.723	0.844	0.661	0.812	0.814
v_{sq}	0.543	0.436	1.245	0.544	0.410	1.327	0.567	0.458	1.238
I_F	0.449	0.960	0.468	0.430	0.928	0.463	0.477	0.978	0.488
d_{rms}	0.856	0.400	2.140	0.835	0.379	2.203	0.924	0.444	2.081
d_{sq}	0.780	0.271	2.878	0.764	0.256	2.984	0.826	0.299	2.763
$S_a(T_n)$	0.536	0.894	0.600	0.507	0.878	0.577	0.546	0.953	0.573
$S_v(T_n)$	0.408	1.009	0.404	0.416	0.968	0.430	0.423	1.047	0.404
$S_d(T_n)$	0.714	0.648	1.102	0.707	0.608	1.163	0.756	0.706	1.071

3.2 实用性分析结果

表 3 列出了基于不同 IM 指标与 IDR 回归分析所得的系数 b 值, 主要分布在 0.2~1.1。由表 3 可知, 断面 A、断面 B 与断面 C 基于 PGA 指标所得到的 b 值分别为 1.063, 1.027, 1.089, 在所有 IMs 中最大。由此可知, 在概率地震需求分析中, 以 PGA 作为 IM 指标的实用性评估结果最佳。基于 PGV、速度反应谱及 Fajfar 强度等指标计算的 b 值与基于 PGA 指标的计算结果非常接近。因此, 上述 3 种 IM 指标的实用性不太理想。

由表 3 可知, 基于 Arias 强度、均方根位移以及位移平方积分等指标计算的 b 值均小于 0.5, 由此说明, 上述 3 种 IM 指标的实用性相对较差。在所有类型的 IM 指标中, 基于位移相关的 IM 指标计算的 b 值相对较小, 说明该类型 IM 指标的实用性较差。基于断面 A、断面 B 与断面 C 的 IM 指标的实用性评估的结果基本一致, 这说以上 IM 指标的实用性分析结论在任何类型断面地铁站均适用。

3.3 有益性评价结果

表 3 列出了基于不同 IM 指标所得到的有益性系数计算结果, 可以看出, 有益性系数分布在 0.3~1.2 之间。其中, 基于 PGA 指标的有益性评价结果最为理想, 如断面 A、断面 B 与断面 C 基于 PGA 指标计算的有益性系数分别为 0.33, 0.33, 0.323。基于速度反应谱、PGV 以及 Fajfar 强度等指标计算的有益性系数均小于 0.5, 以上 3 种 IM 指标的有益性评估结果仅仅差于 PGA 指标。在 15 中 IM 指标中, 基于 PGD、速度

平方积分、位移均方根、位移平方积分以及位移反应谱等指标的有益性结果相对较差, 其有益性系数均大于 1。进一步对比基于不同地铁站断面类型的有益性分析结果可以发现, 其有益性系数基本一致。由此说明, 地铁站地下框架结构断面类型对 IM 指标有益性的评价结果的影响甚微。

3.4 充分性分析结果

表 4 列出了基于不同 IM 指标计算的 P -value 值。由表 4 可知, 所有 IM 指标基于残差-震级回归分析所得到的 P -value 值均大于 5%, 由此说明, 15 种 IM 指标与震级均不存在相关性, 即所有 IM 指标相对于震级的充分性评价均成立。然而, 在基于残差-震源距的回归分析中, 以 PGD、均方根位移、位移平方积分与位移反应谱等指标计算所得到的 P -value 值均小于 5%, 以上 IM 指标不满足充分性检验。

综上所述, 在地铁站地下框架结构概率地震需求分析中, 基于效率性、实用性以及有益性等标准的分析结果表明: 以 PGA、速度反应谱、PGV 作为 IM 指标较为理想, 其中又以 PGA 指标最佳。分析认为, 地下结构的破坏与结构变形相关, 但由于受周围土层的约束, 结构的变形基本由一维场地的动力响应决定, 而自由场响应在某种程度上与所输入的 PGA 密切相关, 因此, 本文的研究结论在一定程度上与当前地下结构地震响应规律的认识相呼应。而 PGD、速度平方积分、均方根位移、位移平方积分以及位移反应谱等指标不适合应用于地下结构的概率地震需求分析。

表 4 基于残差-震级与残差-震源距回归分析所得到的 P -values

Table 4 P -values obtained from regression analysis based on residual-magnitude and residual-distance

IM	P -value (震级)			P -value (震源距)		
	断面 A	断面 B	断面 C	断面 A	断面 B	断面 C
PGA	0.874	0.813	0.578	0.618	0.740	0.541
PGV	0.084	0.181	0.182	0.137	0.180	0.179
PGD	0.098	0.155	0.128	0.021	0.032	0.021
a_{rms}	0.310	0.291	0.161	0.124	0.165	0.079
a_{sq}	0.591	0.561	0.353	0.428	0.533	0.344
I_a	0.616	0.588	0.387	0.749	0.832	0.661
I_c	0.566	0.525	0.326	0.332	0.389	0.239
v_{rms}	0.250	0.334	0.344	0.227	0.240	0.249
v_{sq}	0.260	0.350	0.368	0.184	0.201	0.205
I_F	0.083	0.161	0.181	0.128	0.163	0.168
d_{rms}	0.127	0.179	0.154	0.024	0.033	0.023
d_{sq}	0.134	0.188	0.166	0.028	0.037	0.027
$S_a(T_n)$	0.696	0.664	0.503	0.419	0.485	0.339
$S_v(T_n)$	0.147	0.255	0.274	0.442	0.452	0.515
$S_d(T_n)$	0.096	0.153	0.126	0.021	0.033	0.022

基于充分性标准的分析结果表明：除 PGD、均方根位移、位移平方积分与位移反应谱等指标，其它 11 种 IM 指标均满足充分性检验。此外，不同断面类型的地铁车站之间的 IM 指标分析结果并无显著差异，由此说明 IM 指标的选择与地下结构断面类型无关。分析认为，本文的断面类型虽有不同，但均属于浅埋地下框架结构，这决定了本文分析对象的地震响应规律与破坏机理是基本一致的。在此前提下，由于地下结构受周围土层约束，其峰值层间位移随输入地震动强度的变化规律，基本与自由场响应随输入地震动强度的变化规律一致。由此推断，基于效率性、实用性、有益性及充分性 4 个标准对层间位移角-PGA 的评价结果，与自由场响应-PGA 的评价结果相一致，因此，浅埋地下框架结构断面类型的改变并不会改变地震动强度指标的评价结果。

4 结 论

本文从基于性能的抗震设计理念出发，开展了浅埋地铁车站地下框架结构最优 IM 指标的研究。选取了 3 种不同断面类型的地铁车站，基于 ABAQUS/Standard 软件平台建立了土-结构相互作用有限元分析模型。数值模型中考虑了土体在循环荷载作用下的非线性动力特性以及钢筋混凝土结构在单轴拉压下的塑性损伤力学特性。参考所出台的 FEMA-P695 报告，选取了 22 条远场地震动记录，并通过 IDA 方法获取了地下结构在不同地震动强度激励下的地震响应。以峰值层间位移角作为结构的损伤指标，并基于效率性、实用性、有益性以及充分性 4 个标准对 15 种 IM 指标进行评估，得到以下 5 点结论。

(1) 基于效率性的分析结果表明，加速度相关的 IM 指标一般具有较好的效率性。其中，PGA 指标的效率性最好，其次为加速度平方积分指标，而基于 PGD、均方根位移、位移平方积分与位移反应谱等指标的效率性相对较差。

(2) 基于实用性的分析结果表明，以 PGA、PGV 与速度反应谱等指标的实用性相对较好，而基于 Arias 强度、均方根位移与位移平方积分等指标的实用性最差。此外，基于位移相关的 IM 指标的实用性表现相对较差。

(3) 基于有益性的分析结果表明，PGA 指标最适合应用于地下结构在概率地震需求分析，其次为加速度反应谱与 PGV 等指标。基于 PGD、速度平方积分、均方根位移、位移平方积分与位移反应谱强度等指标的有益性相对较差。

(4) 基于充分性的检验结果表明，15 种候选 IM 指标均满足震级的充分性检验。然而，基于 PGD、均方根位移、位移平方积分与位移反应谱强度等指标不满足基于震源距的充分性检验，因此，以上 4 种 IM 指标不适合应用于地下结构的概率地震需求分析。

(5) 通过对比 3 种不同断面类型地铁车站的分析结果可以发现，IM 指标的最优选择与地下结构的断面类型无关。

综上所述，本文建议选取 PGA 作为 IM 指标进行浅埋地铁车站地下框架结构的概率地震需求分析，速度反应谱强度指标与 PGV 指标可作为备选。其成果可为浅埋地下框架结构地震危险性分析或基于性能的抗震设计提供科学研究基础。然而，本文所研究的对象仅考虑了浅埋地铁车站工程，且所输入荷载的均选自

远场地震动记录。因此, 有关深埋或其它特性地震动记录输入下地下结构地震动强度指标的选择有待进一步研究。

参考文献:

- [1] FEMA-P58-1. Seismic Performance Assessment of Buildings (volume 1—Methodology)[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2018.
- [2] GHOSH S, GHOSH S, CHAKRABORTY S. Seismic fragility analysis in the probabilistic performance-based earthquake engineering framework: an overview[J]. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 2021, **13**(1): 122-135.
- [3] MACKIE K, STOJADINOVIC B. Seismic demands for performance-based design of bridges[M]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2003.
- [4] HARIRI-ARDEBILI M A, SAOUMA V E. Probabilistic seismic demand model and optimal intensity measure for concrete dams[J]. Structural Safety, 2016, **59**: 67-85.
- [5] PADGETT J E, NIELSON B G, DESROCHES R. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, **37**(5): 711-725.
- [6] GUO J J, ALAM M S, WANG J Q, et al. Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand models of a cable-stayed bridge based on generalized linear regression models[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **131**: 106024.
- [7] KHOSRAVIKIA F, CLAYTON P. Updated evaluation metrics for optimal intensity measure selection in probabilistic seismic demand models[J]. Engineering Structures, 2020, **202**: 109899.
- [8] PEJOVIC J, SERDAR N, PEJOVIC R. Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand models of RC high-rise buildings[J]. Earthq Struct, 2017, **13**(3): 221-30.
- [9] 周颖, 苏宁粉, 吕西林. 高层建筑结构增量动力分析的地震动强度参数研究[J]. 建筑结构学报, 2013, **34**(2): 53-60. (ZHOU Ying, SU Ningfen, LÜ Xilin. Study on intensity measure of incremental dynamic analysis for high-rise structures[J]. Journal of Building Structures, 2013, **34**(2): 53-60. (in Chinese))
- [10] DU A, PADGETT J E, SHAFIEEZADEH A. A posteriori optimal intensity measures for probabilistic seismic demand modeling[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, **17**(2): 681-706.
- [11] 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.
- [12] 张成明, 钟紫蓝, 甄立斌, 等. 适用于圆形隧道损伤评价的地震动强度指标研究[J]. 工程力学, 2021, **38**(1): 100-108. (ZHANG Chengming, ZHONG Zilan, ZHEN Libin, et al. Seismic intensity measures for the damage evaluation of circular tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2021, **38**(1): 100-108. (in Chinese))
- [13] 赵密, 郭梦园, 钟紫蓝, 等. 面向地下结构的最优地震动峰值指标随埋深变化规律[J]. 地震学报, 2022, **44**(1): 15-25. (ZHAO Mi, GUO Mengyuan, ZHONG Zilan, et al. Variation law of optimal seismic peak intensity measures for underground structures with burial depth[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, **44**(1): 15-25. (in Chinese))
- [14] HOSSEIN E, FATEMEH J. Selection of seismic intensity measures for prescribed limit states using alternative nonlinear dynamic analysis methods[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2020, **50**(5): 1235-1250.
- [15] 张佩, 路德春, 杜修力, 等. 深埋隧道与浅埋隧道划分方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 422-427. (ZHANG Pei, LU Dechun, DU Xiuli, et al. Division method for deep and shallow tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 422-427. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] TSINIDIS G, PITILAKIS K, TRIKALIOTI A D. Numerical simulation of round robin numerical test on tunnels using a simplified kinematic hardening model[J]. Acta Geotechnica, 2014, **9**(4): 641-659.
- [18] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, **6**(6): 773-781.
- [19] 庄海洋, 任佳伟, 王瑞, 等. 两层三跨框架式地铁地下车站结构弹塑性工作状态与抗震性能水平研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 131-138. (ZHUANG Haiyang, REN Jiawei, WANG Rui, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station with two layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 131-138. (in Chinese))
- [20] 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 Xiuli, JIANG Jiawei, XU Zigang, et al. Study on quantification of seismic performance index for rectangular frame subway station structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(10): 111-119, 128. (in Chinese))
- [21] DU X L, JIANG J W, EL 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, 2021, **50**(2): 655-672.
- [22] 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 Zhen, SHENG Qian, LENG Xianlun, et al. Performance-based seismic stability assessment of large underground cavern group with incremental dynamic analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 703-712. (in Chinese))
- [23] 钟紫蓝, 申轶尧, 郝亚茹, 等. 基于 IDA 方法的两层三跨地铁地下结构地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 916-924. (ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, HAO Yaru, et al. Seismic fragility analysis of two-story and three-span metro station structures based on IDA method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 916-924. (in Chinese))
- [24] VAMVATSIKOS DIMITRIOS, CORNELL C ALLIN. Seismic Performance, Capacity and Reliability of Structures as Seen Through Incremental Dynamic Analysis[D]. Stanford University Stanford, CA, USA, 2002.
- [25] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Applied incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Spectra, 2004, **20**(2): 523-553.
- [26] VAMVATSIKOS D, FRAGIADAKIS M. Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009: 2010, **39**(2): 141-63.
- [27] 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, **6**(2): 1-16. (LIAO Zhenpeng, LIU Jingbo. Elastic wave motion in discrete grids[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, **6**(2): 1-16. (in Chinese))
- [28] 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 Xiuli, MA Chao, LU Dechun, 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))
- [29] DU X, 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.
- [30] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ 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 Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(12): 1522-1533.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, **124**(8): 892-900.
- [34] BESSELING J F. 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, 1958, **25**(4): 529-536.
- [35] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 888-895. (ZHAO Dingfeng, RUAN Bin, CHEN Guoxing, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 888-895. (in Chinese))
- [36] 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.
- [37] FEMA-P695. Quantification of Building Seismic Performance Factors[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2009.