

DOI: 10.11779/CJGE202003010

地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析

钟紫蓝, 申轶尧, 甄立斌, 张成明, 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: 影响地铁车站动力响应的地震动强度参数有多种, 研究地震动强度参数和结构地震响应指标的关联性对地下结构抗震设计具有重要的现实意义。为了研究近场地震动作用下适用于评价地铁地下车站的地震动强度参数, 以大开地铁车站为原型, 基于非线性时程分析结果, 通过对 22 个地震动强度参数与结构地震响应指标进行双对数线性回归分析, 从有效性、实用性和效益性对地震动强度参数与结构地震响应指标进行分析评价。研究结果表明: 以地表峰值加速度 PGA 为代表的加速度型地震动参数和以加速度谱强度 ASI 为代表的谱相关型地震动参数更适合用于研究单层地铁车站结构, 适合用于预测结构在地震作用下的动力响应; 顶底板层间位移角、中柱底部剪力和中柱底部弯矩适合作为预测地铁地下结构的动力响应指标。

关键词: 地震动; 强度参数; 非线性动力分析; 地震响应指标; 有效性

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)03-0486-09

作者简介: 钟紫蓝(1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事地下结构抗震研究工作。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn。

Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures

ZHONG Zi-lan, SHEN Yi-yao, ZHEN Li-bin, ZHANG Cheng-ming, ZHAO Mi, DU Xiu-li

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

Abstract: There are many kinds of ground motion intensity measures that affect the dynamic response of metro stations. It is of great practical significance to study the correlation between the ground motion intensity measures and the structural seismic response indexes for seismic design of underground structures. In order to study the ground motion intensity measures suitable for evaluating subway underground stations under the near-field ground motion, the Daikai metro station is taken as the prototype. Based on the results of nonlinear time-history analysis, through the bilinear logarithmic regression analysis of 22 seismic intensity measures and structural seismic response indexes, the ground motion intensity measures and structural seismic response indexes are analyzed and evaluated in terms of efficiency, practicality and proficiency. The results show that the acceleration ground motion intensity measure represented by PGA and the spectral correlation ground motion intensity measure represented by ASI are more suitable for studying one-story subway station structures, which are suitable for predicting the dynamic response of structures under ground motion. The drift ratio between the top slab and the bottom slab, the shear force at the bottom of the middle column and the bending moment at the bottom of the middle column are suitable as the dynamic response indexes for predicting the underground subway structures.

Key words: ground motion; intensity measure; nonlinear dynamic analysis; seismic response index; efficiency

0 引言

地震动强度参数(intensity measure, IM)是表征地震动强度的指标, 包含着大量和地震动特性相关的信息。在结构抗震分析中, 不同地震动强度参数在评估同一场地相同结构的地震响应时存在较大的差异性。因此如何根据合理的地震动强度参数来选择和调整实测地震记录进行结构地震动力响应分析, 一直是结构工程抗震研究所面临的一个难点。

已有研究表明, 当采用合适的 IM 和结构地震响

应指标(engineering demand parameter, EDP)时, 可以减少结构动力响应分析计算结果的离散性, 提高计算效率, 因此, 选用合理的地震动强度参数对结构动力响应分析至关重要。已有研究多用基于有效性

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978020); 国家自然科学基金联合基金项目(U1839201); 广东省地震工程与应用技术重点实验室开放基金项目(2017B030314068)

收稿日期: 2019-07-10

***通信作者** (E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn)

(efficiency) 和充分性 (sufficiency) 两方面来衡量所选用的 IM 指标在评价结构地震响应的适用性。Riddell^[1]选取单自由度 (single degree of freedom, SDOF) 系统为研究对象, 采用 90 条地震动记录, 对 23 个地震动强度参数和 4 个结构地震响应变量进行研究, 结果表明: 与地震动峰值位移相关的地震动强度参数对长周期结构的地震响应有显著影响。Padgett 等^[2]选取多跨简支钢梁桥为研究对象, 基于人工合成地震记录和真实地震记录进行了桥梁结构地震响应研究, 研究表明, 地表峰值加速度 (PGA) 和基本周期对应的加速度反应谱, $S_a(T_1, 5\%)$, 是合成地震动记录中效果最佳的, 而累积绝对速度 (CAV) 是所选真实地震动中最佳的。叶列平等^[3]选取 60 条原始地震动, 采用 33 个地震动强度参数, 基于弹塑性 SDOF 系统和多自由度 (MDOF) 系统进行了结构的非线性时程分析, 结合结构的代表性地震响应指标, 研究了不同的地震动强度参数与不同结构地震响应指标的相关性, 发现采用单一地震动指标不适合作为结构地震响应的唯一标准, 应采用复杂的多参数指标对结构地震响应进行合理评价。

增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 方法是近年来逐渐发展起来的一种动力非线性分析方法, 其分析结果可以反映出结构随地震强度增加的损伤演化过程^[4]。基于 IDA 的结构地震响应分析方法已成为结构抗震性能评估常用的方法之一, 但该方法在选择地震记录时缺乏统一标准, 且由于影响地震动的参数很多, 不同的地震动强度参数对结构弹塑性地震响应的影响十分复杂, 同时在现有研究中, 人们多关注于地震动强度指标与地上结构地震响应指标的相关性, 对于地上结构有关地震动强度参数的选取相关学者做了大量的研究, 提供了不少参考指标, 而对于地铁地下车站结构的地震响应与地震动强度参数的研究有限。基于此, 本文以日本大开地铁车站为原型, 选取 22 个地震动强度参数, 考虑近场地震动输入的不确定性, 通过增量动力分析 (IDA) 方法对土-结构体系进行非线性动力时程分析, 从有效性 (efficiency)、实用性 (practicality) 和效益性 (proficiency) 3 方面对所选地震动强度参数进行综合评估。本文对地铁地下车站结构抗震分析选取合理的地震动强度参数提供一定参考意义。

1 地震动强度参数选择

合理的地震动强度参数 IM 是预测结构响应和评价结构地震功能可恢复能力的重要基础, 应能反映结

构地震响应指标或损伤指标。目前常用的地震动强度参数有与结构独立的参数, 如累计绝对速度 (CAV)、Arias 强度 (AI)、均方根加速度 a_{rms} 、PGA、地表峰值速度 PGV 等; 也有与结构相关参数, 如谱加速度 S_a 、谱速度 S_v 、谱位移 S_d 等两类。由于地震动输入具有很强的随机性, 导致结构的结果分析在很大程度上依赖于地震动输入, 采用不同的地震动强度参数所得到的分析结果往往不尽相同。

为了确定地震激励下结构反应的评估而要选择最佳的 IM, 本文在此共选取了 22 个地震动参数指标, 如表 1 所示, 分为加速度型指标、速度型指标、位移型指标和谱相关型指标 4 种。在表 1 中, $a(t)$ 是地表地震动的加速度时程, $v(t)$ 是地表地震动的速度时程, $d(t)$ 是地表地震动的位移时程, g 是重力加速度, t_f 是地震动持时, t_d 是地震动有效强震持时, 其中 $t_d = t_2 - t_1$, t_1 和 t_2 分别为 5% 和 95% AI 值对应的时刻, T_1 是土-地下结构相互作用体系的基本周期。

2 计算模型与地震动记录选取

2.1 计算模型与参数

本文选取 1995 年阪神地震中遭到严重破坏的大开车站进行实例分析, 其横断面尺寸和配筋如图 1 所示^[5]。

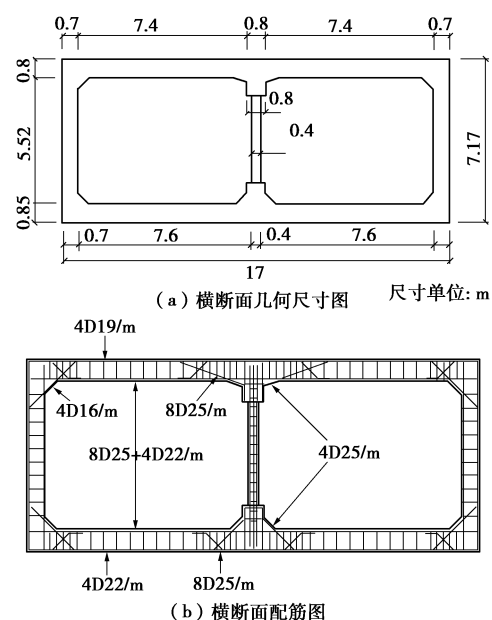


图 1 大开车站横断面详图

Fig. 1 Cross-sectional details of Daikai station

大开车站结构埋深 4.8 m, 所处场地主要由全新世砂土和更新世黏土组成, 该场地的土层情况及其物理力学参数如表 2 所示。经计算该场地土层等效剪切波速为 $v_{se} = 192$ m/s, 根据中国《城市轨道交通结构抗震设

表 1 本文选用的地震动强度参数
Table 1 Intensity measures used in analysis

类别	编号	名称	定义	类别	编号	名称	定义
加速度 相关型	1	峰值加速度	$PGA=\max a(t) $	谱相 关型	13	结构基本周期 谱加速度	$S_a(T_1, \xi = 0.05)$
	2	Arias 强度	$AI=\frac{\pi}{2g}\int_0^{t_f} a^2(t)dt$		14	结构基本周期 谱速度	$S_v(T_1, \xi = 0.05)$
	3	累计绝对速度	$CAV=\int_0^{t_f} a(t) dt$		15	结构基本周期 谱位移	$S_d(T_1, \xi = 0.05)$
	4	均方根加速度	$a_{rms}=\sqrt{\frac{1}{t_d}\int_{t_1}^{t_2} a^2(t)dt}$		16	加速度谱强度	$ASI=\int_{0.1}^{0.5} S_a(T, 5\%)dT$
	5	复合加速度	$I_a=PGA\cdot t_d^{1/3}$		17	速度谱强度	$VSI=\int_{0.1}^{2.5} S_v(T, 5\%)dT$
	6	特征强度	$I_c=(a_{rms})^{3/2}\sqrt{t_d}$		18	位移谱强度	$DSI=\int_{2.0}^{5.0} S_d(T, 5\%)dT$
	7	加速度平方积分	$a_{sq}=\int_0^{t_f} a^2(t)dt$	位移 相关 型	19	峰值位移	$PGD=\max d(t) $
速度相 关型	8	峰值速度	$PGV=\max v(t) $		20	均方根位移	$d_{rms}=\sqrt{\frac{1}{t_d}\int_{t_1}^{t_2} d^2(t)dt}$
	9	均方根速度	$v_{rms}=\sqrt{\frac{1}{t_d}\int_{t_1}^{t_2} v^2(t)dt}$		21	位移平方积分	$d_{sq}=\int_0^{t_f} d^2(t)dt$
	10	速度平方积分	$v_{sq}=\int_0^{t_f} v^2(t)dt$		22	复合位移	$I_d=PGD\cdot t_d^{1/3}$
	11	复合速度	$I_v=PGV^{2/3}\cdot t_d^{1/3}$				
	12	Fajfar 强度	$FI=PGV\cdot t_d^{0.25}$				

表 2 土层的性质

Table 2 Properties of soils

土层信息	土层深度/m	密度/(kg·m ⁻³)	剪切波速/(m·s ⁻¹)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
人工填土	0~1.0	1900	140	0.33	20	15
全新世砂土	1.0~5.1	1900	140	0.32	1	40
全新世砂土	5.1~8.3	1900	170	0.32	1	40
更新世黏土	8.3~11.4	1900	190	0.40	30	20
更新世黏土	11.4~17.2	1900	240	0.30	30	20
更新世砂土	17.2~39.2	2000	330	0.26	1	40

表 3 钢筋及混凝土材料参数

Table 3 Material parameters of steel rebar and concrete

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模 量 E/GPa	泊松 比 ν	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_{cu}/MPa	峰值压 应变 ε_{c0}	极限压 应变 ε_{cu}
混凝土	2500	24	0.15	—	14.3	2.1	12.2	0.002	0.0038
钢筋	7800	200	0.3	235	—	—	—	—	—

计规范》(GB 50909—2014)^[6]对场地类别的划分,该场地属于 II 类场地,相当于日本抗震规范的中硬土地。虽然中国的抗震规范依靠场地覆盖土层厚度和等效剪切波速来进行场地划分,而日本规范则依据场地特征周期 T_g ^[7],但究其根本均依赖场地等效剪切波速,因此本文分析结果对国内工程也具有一定参考价值。

采用通用有限元软件 ABAQUS 对大开车站横断面进行地震反应分析,土-结构系统的有限元模型如图 2 所示。对本文所建土-结构系统有限元模型进行模态分析,得到土-地下结构模型体系的基本周期 $T_1=0.51$ s。建模时结构采用两节点线性梁单元 (B21),周围土体采用四节点二次减缩积分平面应变单元 (CPE4R)。土体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型,该

模型可以用来模拟土、岩石等摩擦型材料,可考虑材料各向同性硬化或软化以及材料阻尼效应,可以较好的描述岩土介质的力学行为^[8]。结构采用 C30 混凝土材料,弹性模量取 2.4×10^4 MPa,密度取为 2.5×10^3 kg/m³。在二维平面应变分析时,考虑到中柱在车站纵向是等间距 (3.5 m) 分布,为保证等效前后截面的抗弯刚度、抗剪刚度、抗压刚度及截面质量均不改变,故等效后的中柱弹性模量取 7.0×10^3 MPa,密度取为 7.14×10^2 kg/m³。为了尽可能消除边界效应对地下结构地震反应的影响,场地的计算宽度应取地铁车站结构宽度的 5 倍以上为宜^[9],本文的模型地基的宽度取 170 m,工程基岩地面位于地下 39.2 m。模型的底部在竖直方向进行约束,在模型两侧边设置捆绑边界

(equal-displacement boundary)^[10], 强制侧面边界上所对应点的位移相同, 该边界适用于成层分布土层的弹塑性分析问题, 并把地震动记录作为平面剪切波在土体底部输入。考虑土-结构之间黏结、滑移和脱开, 采用接触面对法模拟土和结构之间的接触效应, 接触面法向采用“硬接触”, 切向接触采用库仑摩擦模型, 摩擦系数 μ 为 0.4^[11]。土体按照数值模拟精度要求离散, 单元网格尺寸小于 1/10~1/8 波长^[12], 在这里取土体单元网格尺寸为 1 m。

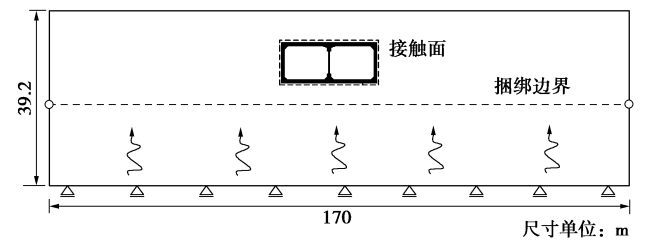


图 2 土-结构相互作用有限元模型

Fig. 2 Finite element model for soil-structure interaction system

考虑到结构的非线性, 在此使用基于 ABAQUS 开发的一组材料单轴滞回本构模型 PQ-Fiber^[13], 主要用于在钢筋混凝土结构、钢结构等的弹塑性时程分析中定义杆系结构的材料本构单元。采用 ABAQUS 中的铁木辛柯梁单元 B21, 通过*rebar 关键字在梁单元中插入“钢筋”, 可以模拟钢筋的力学行为。其中, 钢筋采用考虑随动硬化弹塑性本构的 USteel02 模型, 混凝土材料本构选用 PQ-Fiber 截面纤维模型中的混凝土模型 UConcrete02, 该模型能够考虑混凝土的抗拉强度。混凝土和钢筋非线性本构关系如图 3 所示, 材料参数如表 3 所示。

依据上述参数建立土-结构模型, 采用阪神地震中神户气象台和神户大学的时程记录作为输入地震动, 为了证明数值模拟的合理性, 将所得结果与李洋^[14]和杜修力等^[15]两者的计算分析结果进行了对比, 如表

4 所示, 当相同的土和结构模型采用不同的本构模型时, 所得结果会有偏差, 但是误差不大, 证明本文所用模型的合理性。

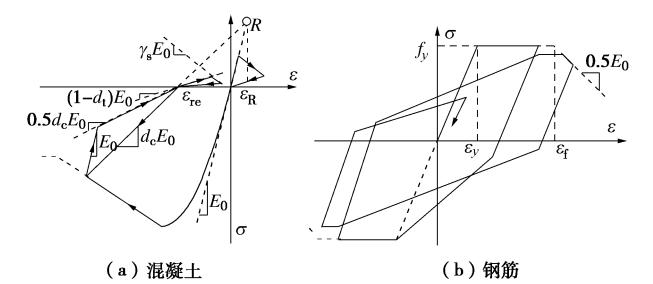


图 3 混凝土和钢筋非线性本构关系

Fig. 3 Nonlinear constitutive models for concrete and reinforcement

2.2 地震动记录选取

鉴于地震动特性是影响地下结构地震反应的关键因素^[16], 不同特性的地震动会引起结构不同的破坏现象, 同时根据对已有的近场地震动的研究表明: 近场地震动与远场地震动的特性有很大差异, 近场地震动下的结构相对于远场地震动的结构破坏更为严重, 且近场地震动是地震造成的地面运动中最复杂的, 与断层破裂过程、滑动方向及速度、断层面上位错的发展过程等众多因素相关^[17]。近年来发生的近场地震动, 如美国的 Northridge 地震 (1994)、日本的 Kobe 地震 (1995)、台湾 Chi-Chi 地震 (1999)、台湾花莲地震 (2018) 等都证实了结构在这种类型的地震动下将会产生更严重的破坏。本文从 PEER 强震记录数据库^[18] (<http://peer.Berkeley.edu/nga>) 中根据矩震级大于 6.5 级, 震中距小于 10 km 选取了 6 组水平向近断层地震记录数据。所选的地震记录信息见表 5, 图 4 为所选 12 条地震记录的加速度反应谱曲线。本文以此获得的地震记录为基础对不同地震动强度指标与结构响应指标的关联性进行研究。

表 4 计算结果对比

Table 4 Comparison of calculated results

类别	本构模型		输入地震动	层间位移角 /%	误差 /%	峰值剪应力 /(kN·m ⁻¹)	误差 /%
	土体	结构					
李洋(3D)	Mohr-Coulomb 模型	弹塑性模型	神户大学	1.00	—	250	—
本文结果(2D)	Drucker-Prager 模型	PQ-Fiber 模型		0.90	10.0	211	15.6
杜修力等(3D)	弹塑性本构模型	弹塑性模型	神户气象台	1.20	—	283	—
本文结果(2D)	Drucker-Prager 模型	PQ-Fiber 模型		1.00	16.7	269	4.95

表 5 本文选用的近断层地震记录
Table 5 Near-fault ground motion records

编号	地震	台站	震级 M_w	震中距 /km	地震动分量	PGA/g	PGV/(cm·s ⁻¹)	总时间 /s
1	Kobe, Japan,	Kobe	6.9	0.92	KBU000	0.276	55.3	32
2	1995	University			KBU090	0.312	30.9	
3	Kobe, Japan,	KJMA	6.9	0.94	KJM000	0.834	91.1	32
4	1995				KJM090	0.630	76.1	
5	Kobe, Japan,	Port Island(0m)	6.9	3.31	PRI000	0.348	90.6	42
6	1995				PRI090	0.290	51.1	
7	Kobe, Japan,	Takatori	6.9	1.47	TAK_000	0.618	120	40
8	1995				TAK_090	0.671	123	
9	Imperial	El Centro Array #5	6.53	3.95	H-E05_140	0.529	48.9	32
10	Valley-06				H-E05_230	0.383	96.9	
11	Erzican, Turke	Erzincan	6.69	4.38	ERZ-NS	0.387	107	21
12	y, 1999				ERZ-EW	0.496	78.1	

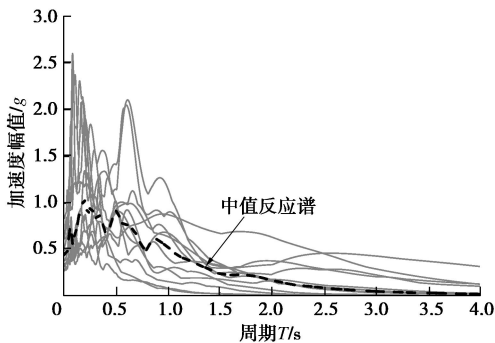


图 4 地震加速度反应谱曲线 (阻尼比=0.05)
Fig. 4 Acceleration response spectra of selected ground motions (damping ratio = 0.05)

3 地震动强度参数评价

在基于性能的地震工程计算中，地震动强度参数与结构地震响应指标的选择决定着计算分析过程中的计算量以及结果的精度。合理的结构地震响应指标能较真实反映地震作用下结构的损伤状态，例如地上结构一般常选用最大层间位移角 θ_{\max} 作为反映结构破坏程度的工程需求参数。对于地下车站结构，许成顺等^[19]研究表明：在水平地震作用下，结构中柱与侧墙的水平相对变形相差不大；结构中柱底部由于构件截面较小最先达到其极限承载力，是承载力验算的关键截面。同时根据庄海洋等^[20]对地下结构响应指标的定义和相关取值，本文在此选取地铁车站顶底板水平相对位移，中柱底部的轴力、弯矩和剪力作为结构地震响应指标，计算时均选取动力时程结果的绝对值最大值。

为了考虑地震动强度对土-结构系统随机地震反应的影响，对上述 12 条地震动记录进行调幅，每条地震动记录的计算峰值加速度按比例调整，将土体底部输入的地震动峰值分别调整为 0.05g~1.0g，共 180 条地震动记录(每个调整的 PGA 水平下包括 12 条记录)分别作用于二维土-结构有限元模型，通过 IDA 分析，可对结构在地震作用下的反应从弹性到弹塑性直到结构动力失稳做出全面的评估，同时能够反映出结构在

不同强度等级地震下的地震需求能力和整体抗倒塌能力，能够体现出结构的强度、刚度及变形的变化过程。根据地震动强度参数的评价标准：有效性、实用性和效益性对上述弹塑性有限元模型的动力反应结果进行综合评价分析。

3.1 有效性

地震动强度参数的有效性是指，能够使在指定的地震动强度条件下工程需求参数结果的离散性相对较小，从而在不降低精度的前提下，减少分析所需的地震动记录数量和非线性动力时程分析次数^[21]，在此可通过条件对数标准差 β 来判别。选择一个有效的地震动强度参数能够使在指定的地震动强度条件下结构反应的离散性相对较小，从而在不降低精度的前提下，减少估计条件概率 $P(\text{EDP} | \text{IM})$ 和用于进行结构易损性分析时所需要的地震动数量和非线性分析次数^[21]。

Cornell 等^[22]指出：结构地震响应指标与地震动强度参数之间近似满足指数关系，其关系式形式如式(1)所示。该关系式得到了国内外研究人员的广泛认可，在此本研究也采用该关系式研究合理的地震动强度参数。

$$\ln(\text{EDP}) = \ln(a) + b \cdot \ln(\text{IM}) \quad (1)$$

由于式(1)满足一元线性回归模型，可采用最小二乘法原理对获得的 n 个离散点 $(\text{IM}_i, \text{EDP}_i)$ 进行回归分析，进而获得 $\ln(\text{IM})$ 与 $\ln(\text{EDP})$ 的经验回归直线，并得到条件对数标准差如下：

$$\beta_{\ln(\text{EDP}|\text{IM})} = \sqrt{\frac{\sum (\ln(\text{EDP}) - \ln(a \cdot \text{IM}^b))^2}{n - 2}} \quad (2)$$

式中， n 表示非线性动力时程分析的次数。对于一个地震动参数 IM 来说，其值越小，结构响应的离散性越小，所选地震动强度参数的有效性越高，反之则越差。

图 5 通过数据离散和线性回归方程得出了地震激励下地铁车站中柱的最大层间位移角 θ_{\max} 关于地表峰值加速度 PGA、速度谱强度 VSI 和地表峰值位移 PGD

的有效程度, 直观的展现了结构地震响应指标与地震动强度参数的有效性, 由图 5 可知, $\ln\text{PGA}-\ln\theta_{\max}$ 的离散性最小 ($\beta=0.23$), 说明 PGA 的有效性最好; VSI 有效性次之 ($\beta=0.37$), PGD 的有效性最差 ($\beta=0.43$)。由于 PGD 指的是地表的绝对位移, 并不直接表征地下结构顶底板位置处所在土层的相对位移, 故 PGD 的有效性较差。此外, 土-地下结构相互体系可以看成是一个广义结构。对于一个广义结构的横断面来说, 峰值加速度与结构的受力水平具有较明显的相关性, 故在此 PGA 所得结果的离散性更小。

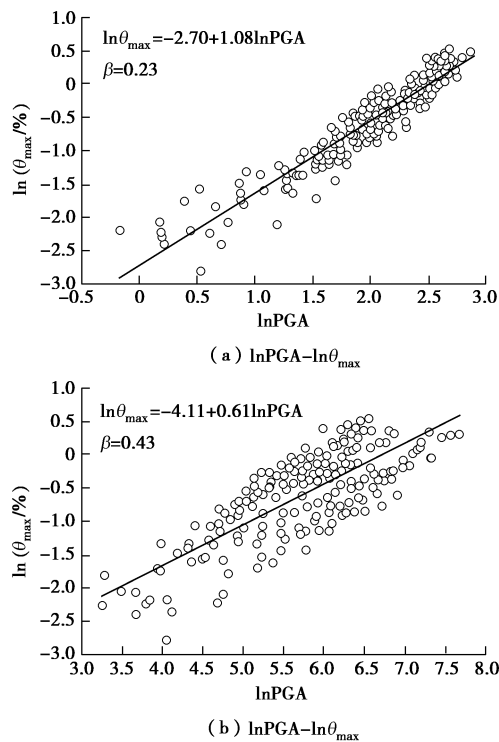


图 5 不同地震动强度参数有效性的比较

Fig. 5 Comparison of efficiency of different IMs

图 6 展示了表 1 中不同地震动强度参数的条件对数标准差 β 值。统计结果表明: ①采用结构中柱底部轴力和剪力为 EDP 时, 结果的离散性较小, 以层间位移角为 EDP 时, 结果的离散性最大。②对于层间位移角来说, 加速度型指标、速度型指标和位移型指标的对结构响应的离散性整体从左往右呈现逐渐增大的趋势, 且在谱相关型指标 β 值中, 加速度谱强度 ASI 离散性最小, 最适合作为谱相关型的 IM。对于弯矩、轴力和剪力来说, 以加速度型指标、速度型指标、位移型指标和谱相关型指标为 IM, 计算结构响应的离散性整体变化不大。③对不同的 EDP 而言, 前 3 个最有效的 IMs 分别是 ASI, PGA, I_a , 以 PGA 和 I_a 为代表的加速度型指标和以 ASI 为代表的谱相关型指标均适用于预测地铁地下结构在地震作用下的结构响应, 不适合作为预测结构在地震作用下的地震动强度参数有弹性加速度反应谱 S_a 、速度反应谱 S_d 和位移谱强度 DSI。

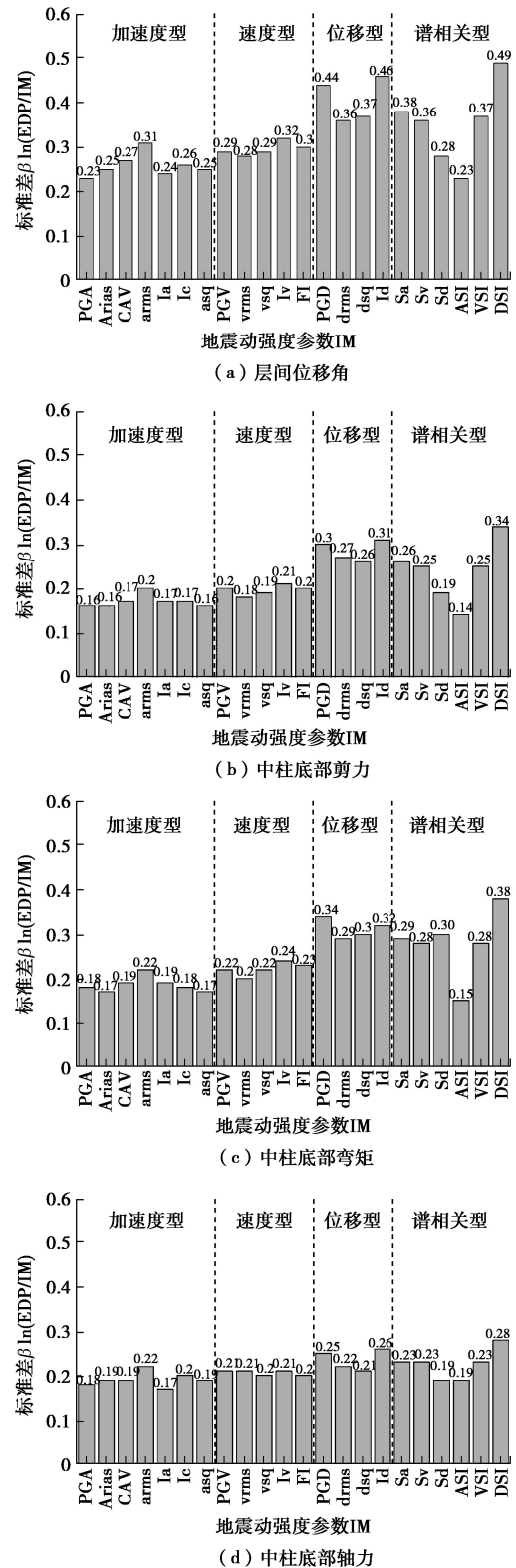


图 6 不同地震动强度参数与结构地震响应指标的有效性计算结果

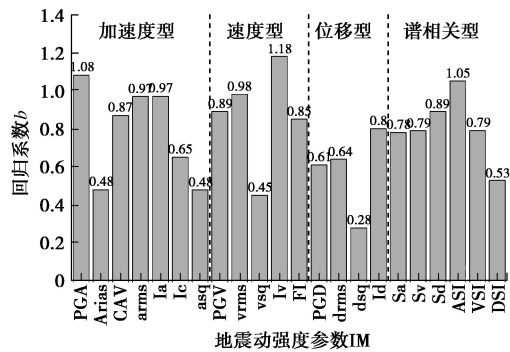
Fig. 6 Results of efficiency of different IMs and EDPs

3.2 实用性

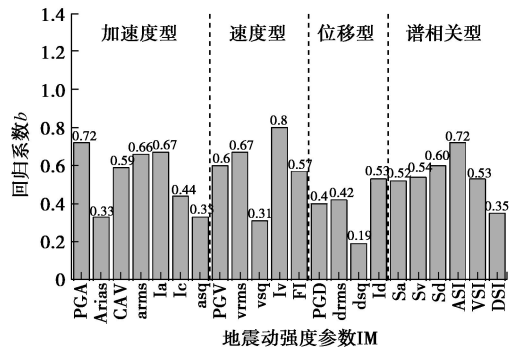
实用性是指地震动强度参数与工程需求参数的关联敏感性^[23]。若某一地震动强度参数实用性不强, 表明结构地震响应指标受该地震动强度参数变化的影响较小。实用性的量化指标通常取式 (2) 中的线性回归

系数 b 来判断^[24]。 b 值越大, 表明该地震动强度参数的变化对结构地震需求参数的影响越大, 实用性越高; 若 b 值趋于 0, 表明该地震动强度参数的变化对结构地震需求参数的无影响, 图 7 阐明了 IM 之间实用性的相对关系。

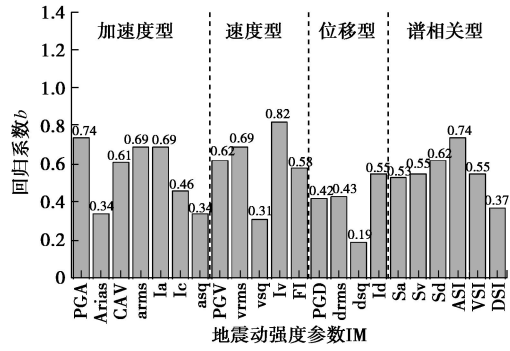
图 7 给出当各个地震动强度参数为自变量时, 回归方程中的回归系数 b 。统计结果表明: ①对于不同的结构地震响应指标, 实用性最好的前 5 个 IMs 分别是 I_v , PGA, ASI, I_a 和 a_{rms} , 实用性最差的前 3 个 IMs 依次是 d_{sq} , v_{sq} 和 a_{sq} 。从实用性的角度看, 近场地震动下以 PGA, I_a 和 a_{rms} 为代表的加速度型指标、以 I_v 为代表的速度型指标和以 ASI 为代表的谱相关型指标均适用于预测地铁地下结构在地震作用下的结构响应, 这些地震动强度参数的变化对结构地震响应造成的影响较小; ②针对同一个地震动参数, 不同结构响应指标的情况, 可以看出层间位移角更适合作为结构地震响应指标, 其次是剪力和弯矩, 最后是轴力。



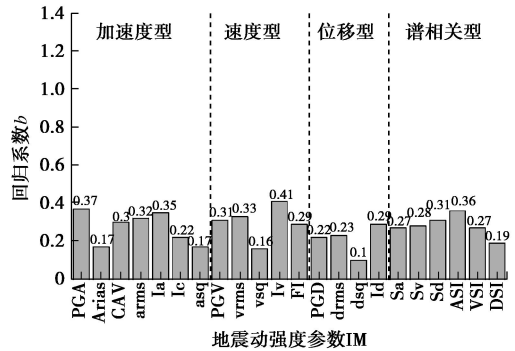
(a) 层间位移角



(b) 中柱底部剪力



(c) 中柱底部弯矩



(d) 中柱底部轴力

图 7 不同地震动强度参数与结构地震响应指标的实用性计算结果

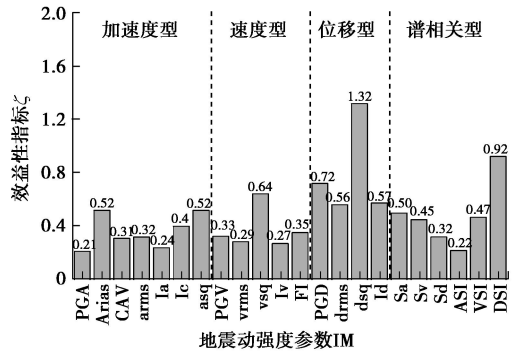
Fig. 7 Results of practicability of different IMs and EDPs

3.3 效益性

效益性指标 ζ ^[24]是综合考虑有效性和实用性的指标, 是线性回归的对数标准差 $\beta_{\ln(\text{EDP}|\text{IM})}$ 和线性回归系数 b 的比值, 即

$$\zeta = \frac{\beta_{\ln(\text{EDP}|\text{IM})}}{b} \quad (3)$$

显然 ζ 值越小, 意味着对应的地震动参数的效益性越高。单纯的分别使用有效性和实用性去衡量 IM, 将会导致对某一个 IM 的适用性评价存在偏差, 而使用效益性指标可以对有效性和实用性这两个评价标准进行平衡。各个地震动强度参数与 4 个结构地震响应指标在近场地震动激励下的效益性评价结果如图 8 所示。由图 8 可以看出, ①对于结构响应指标来说, 层间位移角、剪力和弯矩的效益性相差不大, 而轴力与各地震动参数的效益相关性最差, 说明地震动强度参数的变化对结构地震需求参数的影响较小, 不宜作为结构地震响应指标; ②对于地震动参数来说, 从整体上来看, 加速度型指标和速度型指标的效益性最好, 谱相关型指标效益性次之, 位移型指标效益性较差, 在 22 个 IM 中, 效益性最好的地震动参数是峰值加速度 PGA 和加速度谱强度 ASI, d_{sq} 在 4 种不同的结构响应参数中的效益性最差, 说明其不适用于预测地铁地下结构在地震作用下的结构响应。



(a) 层间位移角

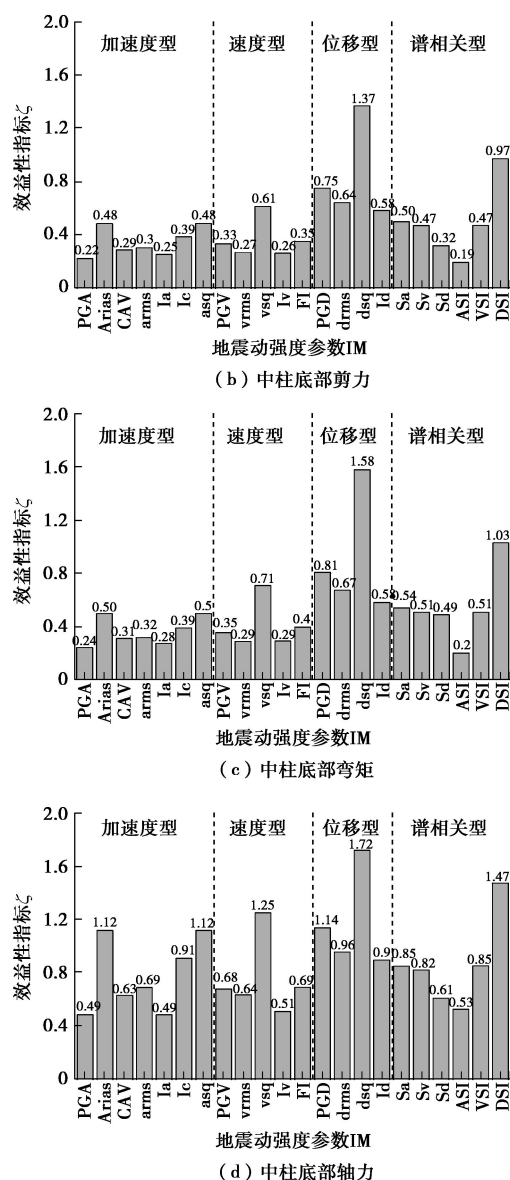


图8 不同IM与EDP的效益性计算结果

Fig. 8 Results of proficiency of different IMs and EDPs

4 结 论

本文围绕适用于地铁地下车站的地震动强度参数展开研究,以大开车站为研究对象,通过引入IDA方法到地下结构的动力响应评价中,采用近场地震动进行非线性动力时程分析,得到不同强度地震动作用下结构体系的动力响应。分别对22个地震动强度参数和结构地震响应指标进行对数线性回归分析,从有效性、实用性和效益性3个方面对不同的地震动参数进行评价,得到了以下结论:

(1) 根据有效性、实用性和效益性的综合评价结果,以PGA和 I_a 为代表的加速度型地震动参数和以ASI为代表的谱相关型地震动参数更适合用于预测单层双跨地铁车站结构在地震作用下的动力响应,同时

层间位移角、中柱底部剪力和弯矩更适合作为地铁地下结构的动力响应指标。

(2) 在地震作用下的4种地震动强度参数中,从有效性来看,加速度型指标的有效性要强于速度型指标、位移型指标和谱相关型指标,表明加速度型指标下得到的结构响应的离散性最小;从实用性来看,加速度型指标和速度型指标的实用性要强于位移型指标和谱相关型指标,表明加速度型指标和速度型指标下得到的结构地震响应受该地震动强度参数变化的影响较小。

(3) 本文的分析中仅考虑单层双跨的单一地铁车站,随着地铁地下结构形式越来越复杂,在后续研究中还需开展不同构造形式的地铁车站和不同场地条件下地下结构地震响应与地震动参数间的相关规律研究,以得到普适性的结论。

参考文献:

- [1] RIDDELL R. On ground motion intensity indices[J]. Earthquake Spectra, 2007, **23**(1): 147 - 173.
- [2] PADGETT J E, DESROCHES R. Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, **37**(8): 1157 - 1174.
- [3] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度参数的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, **29**(4): 9 - 22. (YE Lie-ping, MA Qian-li, MIAO Zhi-wei. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, **29**(4): 9 - 22. (in Chinese))
- [4] 孔宪京, 庞 锐, 邹德高, 等. 基于IDA的高面板堆石坝抗震性能评价[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(6): 978 - 984. (KONG Xian-jing, PANG Rui, ZOU De-gao, et al. Seismic performance evaluation of high CFRD based on incremental dynamic analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(6): 978 - 984. (in Chinese))
- [5] PARRA-MONTESINOS G J, BOBET A, RAMIREZ J A. Evaluation of soil-structure interaction and structural collapse in Daikai subway station during Kobe earthquake[J]. ACI Materials Journal, 2006, **103**(1): 113 - 122.
- [6] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014 [S]. 2014. (Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures: GB50909—2014[S]. 2014. (in Chinese))
- [7] 赵鹏飞. 地震动参数区划及应用对比研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018. (ZHAO Peng-fei. Study on the Zoning of Ground Motion Parameters and its

- Application[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese))
- [8] 还毅, 方秦, 陈力, 等. 强震作用下地铁车站结构损伤破坏的三维非线性动力分析[J]. 北京工业大学学报, 2011(6): 852 - 862. (HUAN Yi, FANG Qin, CHEN Li, et al. 3D Nonlinear damage analysis of metro-station structures under strong seismic loading[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011(6): 852 - 862. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] 庄之敬. 可液化土的地震液化试验及数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (ZHUANG Zhi-jing. Numerical Simulation and Laboratory Research of Liquefiable Soils Deformation During the Earthquake[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [11] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikaistation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(12): 1522 - 1533.
- [12] MA C, LU DC, DU XL. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **74**: 1 - 9.
- [13] 曲哲. 摇摆墙—框架结构抗震损伤机制控制及设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (QU Zhe. Study on Seismic Damage Mechanism Control and Design of Rocking Wall-Frame Structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [14] 李洋. 浅埋地下框架结构地震破坏机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018. (LI Yang. Earthquake Damage Mechanism of Shallow Buried Underground Frame Structures[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [15] 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. (DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, 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. (in Chinese))
- [16] TSINIDIS G. Response characteristics of rectangular tunnels in soft soil subjected to transversal ground shaking[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, **62**: 1 - 22.
- [17] 罗诚. 基于 KiK-net 和 K-NET 台站记录研究熊本 Mw7.0 级地震近场地震动特征[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2017. (LUO Cheng. Characteristic of Near-Field Ground-Motion Observed From KIK-NET and K-NET Stations During Mw 7.0 Kumamoto Earthquake[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese))
- [18] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER NGAstrong motion database[DB/OL]. <http://peer.Berkeley.edu/n-ga>, 2005-4-27/2011-9-3.
- [19] 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等. 地下结构抗震简化分析方法比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, **37**(2): 65 - 80. (XU Cheng-shun, XU Zi-gang, DU Xiu-li, et al. Comparative study of simplified methods for seismic analysis of underground structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, **37**(2): 65 - 80. (in Chinese))
- [20] 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 Hai-yang, REN Jia-wei, WANG Rui, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station having two layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 131 - 138. (in Chinese))
- [21] LUCO N, CORNELL C A. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions[J]. Earthquake Spectra, 2007, **23**(2): 357 - 392.
- [22] 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.
- [23] 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 and Structural Dynamics, 2008, **37**(5): 711 - 725.
- [24] SHAFIEEZADEH A, RAMANATHAN K, PADGETT J E, et al. Fractional order intensity measures for probabilistic seismic demand modeling applied to highway bridges[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, **41**(3): 391 - 409.