

基于增量动力分析的地铁车站结构 地震动强度指标研究*

刘彤¹ 袁勇²

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 110168, 沈阳;

2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 200092, 上海//第一作者, 副教授)

摘要 以某两层三跨地铁车站为案例,建立了土-结构的二维有限元模型。根据地铁车站结构的动力响应特性,选取了基岩处和地铁车站结构底部的加速度峰值、速度峰值、位移峰值、Arias 强度为地震动强度指标,并以结构最大层间位移角作为结构性能指标,采用增量动力分析,建立了不同地震动强度指标与结构性能指标的关系曲线,并对该地铁车站抗震性能评估的有效性进行分析。

关键词 地铁车站结构; 地震动强度指标; 增量动力分析

中图分类号 TU435; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.047

Research on Metro Station Structure Ground Motion Intensity Measure by Incremental Dynamic Analysis

LIU Tong, YUAN Yong

Abstract Taking the case of certain two-storey-three-span metro station, a soil-structure 2D finite element model is established. According to the dynamic response characteristics of metro station structure, the peak acceleration, peak velocity, peak displacement, and Arias intensity at both the bedrock and metro station structure bottom are selected as ground motion intensity measure. By adopting incremental dynamic analysis, the relationship curve of different ground motion intensity measure and structure performance measure is established. Effectiveness of metro station seismic performance evaluation is analyzed.

Key words metro station structure; ground motion intensity measure; incremental dynamic analysis

First-author's address School of Management, Shenyang Jianzhu University, 110168, Shenyang, China

在建筑结构性能化设计的诸多方法中,增量动力分析(IDA)以其能考虑地震动的随机性和结构在强震下的动力响应等优点而得到广泛应用^[1-5]。其

中,用于表征地震动的强度指标(IM)对采用 IDA 进行结构抗震性能评估的结果具有重要影响。

文献[5]和文献[6]以日本大开车站为研究背景,从有效性、实用性和效益性三方面对 IM 进行评估。文献[5]发现,地表加速度峰值和最大场地相对侧移更适用于该车站的地震易损性分析;文献[6]发现,地表加速度峰值和加速度谱强度更适用于该车站的动力响应分析。然而,已有研究主要针对特定的地铁车站结构形式进行 IM 的选取,还需进一步研究具有普适性的地铁车站 IM,以丰富地铁车站结构的相关数据。

本文以上海某两层三跨地铁车站结构为研究案例,结合车站结构的自身动力响应特性,分析地铁车站结构抗震性能评估的表征指标 IM;以基岩处和车站结构底部对应的 8 个地震动强度参数作为 IM,以结构最大层间位移角作为结构的损伤指标(DM),采用 IDA 分析该车站不同 IM 下对应的 IDA 曲线特性;研究 IDA 曲线的离散性,以建立该车站 IDA 分析的有效 IM。

1 算例

1.1 工程背景

本文以较为常见的上海某两层三跨地铁车站为研究案例。如图 1 所示,车站截面宽 20.90 m,高 12.37 m,顶层为站厅层,底层为站台层。所有柱截面尺寸均为 0.60 m × 1.00 m。中柱沿车站纵向间距为 8.00 m。结构中柱配筋如图 1 b)所示。车站的顶板覆土深度为 2.90 m。场地土层参数见表 1,地铁车站结构的混凝土和钢筋的材料参数如表 2 所示。

* 辽宁省科技厅博士科研启动基金计划项目(2021-BS-165)

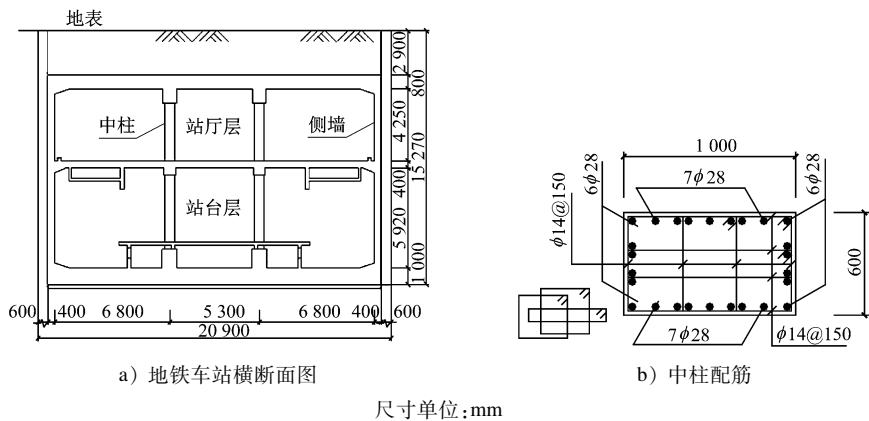


图 1 地铁车站横断面图与中柱配筋

Fig. 1 Cross-section of metro station and reinforcement details of central column

表 1 场地土层参数

Tab.1 Site soil layer parameters

层数	土层名称	深度/m	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
1	人工填土	0 ~ 1.3	19.0	20.34	0.32	15.0	20.0
2	灰黄色粉质黏土	1.3 ~ 2.4	19.2	20.34	0.32	31.3	9.5
3	灰黄色粉质黏土	2.4 ~ 3.3	18.0	14.00	0.34	33.8	15.1
4	灰色淤泥质黏土	3.3 ~ 6.9	17.4	10.85	0.38	28.3	5.3
5	灰色淤泥质黏土	6.9 ~ 14.8	16.7	7.39	0.40	24.9	7.2
6	灰色黏土	14.8 ~ 16.7	17.4	11.55	0.35	29.7	10.0
7	灰绿色黏土	16.7 ~ 21.1	19.5	24.85	0.29	29.1	31.3
8	灰色淤泥	21.1 ~ 28.0	18.2	32.20	0.29	31.1	2.0
9	灰色淤泥	28.0 ~ 43.0	17.7	15.09	0.33	32.5	8.1
10	灰色黏土和粉砂	43.0 ~ 60.0	18.4	28.70	0.32	28.1	8.0

表 2 车站结构材料参数

Tab.2 Station structure material parameters

构件	混凝土				钢筋	
	弹性模量/GPa	轴心抗拉强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa
中柱	33.5	2.51	29.6	0.2	200	400
其它	31.5	2.20	23.4	0.2	200	400

1.2 有限元模型

根据该地铁车站的工程情况,采用 ABAQUS 有限元软件建立了两层三跨车站及其周围土体的二维有限元模型,如图 2 所示。模型长 1 000 m,宽 60

m。结构采用梁单元 B21 模拟,土体采用 CPE4R 四节点平面应变单元和 CINPE4 四边形平面应变无限元模拟。在有限元模型中,材料弹塑性本构、土与结构的接触和模型边界等按文献[3] 设置。

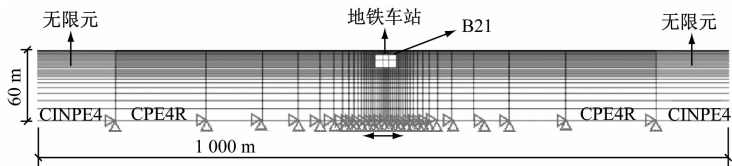


图 2 土-车站结构有限元模型

Fig. 2 Soil-station structure finite element model

1.3 地震波的选取

地震波主要根据场地类别来选取。根据我国抗震规范对场地类别的划分^[7],案例车站的场地类别为Ⅳ类场地。此外,由于 10~20 条地震波可充分

地评估结构的动力需求,能较好地体现地震动的随机性^[8],故本文从太平洋地震动数据库^[9]选取了 12 条地震波的地震动数据,如表 3 所示。

表 3 12 条地震动数据
Tab.3 Twelve ground motion records

地震波编号	地震动名称	地震动测站	地震动分量记录	a_p/g	$v_p/(cm/s)$
1	Imperial Valley-06, 1979	El Centro Array#3	E03140	0.267	47.97
2	Imperial Valley-06, 1979	El Centro Array#3	E03230	0.223	43.29
3	Loma Prieta, 1989	APEEL 2-Redwood City	A02043	0.274	53.65
4	Loma Prieta, 1989	APEEL 2-Redwood City	A02133	0.220	34.12
5	Loma Prieta, 1989	Foster City-Menhaden Court	MEN270	0.110	21.98
6	Loma Prieta, 1989	Foster City-Menhaden Court	MEN360	0.119	20.93
7	Loma Prieta, 1989	Treasure Island	TRI000	0.100	15.59
8	Loma Prieta, 1989	Treasure Island	TRI090	0.160	33.20
9	Superstition Hills-02, 1987	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	IVW090	0.179	31.67
10	Superstition Hills-02, 1987	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	IVW360	0.208	36.21
11	Northridge-01, 1994	Carson-Water St	WAT180	0.091	6.33
12	Northridge-01, 1994	Carson-Water St	WAT270	0.088	8.32

注: g 为重力加速度; a_p 为加速度峰值; v_p 为速度峰值。

1.4 IM 和 DM 的选取

IDA 的重要环节之一就是选择合适的 IM 和 DM^[10]。选取 IM 的基本原则是:选取能直接反映地震动潜在的破坏效应、且在不同地震动强度下 DM 差异最小的 IM。

结合地下结构的动力响应特性,本文重点考虑加速度峰值、速度峰值和位移峰值等 IM,以及 Arias 强度(与持续时间相关的 IM)。

在有限元模型中,地震波输入点为场地基岩处;而地铁车站结构底部为直接反映结构所受地震动强度的位置点。因此,基岩输入处的 IM 和车站结构底部的 IM 均应予以考虑。

基岩处的 IM 为 a_p 、 v_p 、位移峰值 d_p 和 Arias 强度 I_a ;车站结构底部的 IM 为其加速度峰值 $a_{p,B}$ 、速度峰值 $v_{p,B}$ 、位移峰值 $d_{p,B}$ 和 Arias 强度 $I_{a,B}$,如图 3 所示。

选取结构最大层间位移角 θ_{max} 作为 DM。

通过 Deepsoil 软件将地震动数据设置至基岩输入处。对于每条地震动数据:首先,调整 v_p 分别至 0.03 m/s, 0.05 m/s, 0.10 m/s, 0.20 m/s, 0.30 m/s, 0.40 m/s, 0.50 m/s, 0.60 m/s, 0.70 m/s 及 0.80 m/s,作为 10 个地震动强度水平工况;然后,计



图 3 IM 示意图

Fig.3 Schematic diagram of IM

算各工况对应的 IM;最后,在每个 IM 水平下分别进行非线性动力时程分析,提取 DM 值,从而得到该地震动数据对应的 IDA 曲线。导入表 3 中的 12 条地震动数据,并重复上述过程,即可得到 IDA 曲线簇。

2 IDA 计算结果

2.1 IDA 曲线特性

图 4 为不同 IM 对应的 IDA 曲线簇。由图 4 可知:对同一车站结构和相同的土层条件,在不同地震波作用下,结构的响应存在差异性;IDA 曲线虽离散程度不同,但曲线发展趋势基本相同;车站结

构的 θ_{\max} 均随着地震动强度的增加而不断增大,且随着增大幅度不断提高,曲线斜率逐渐减小。

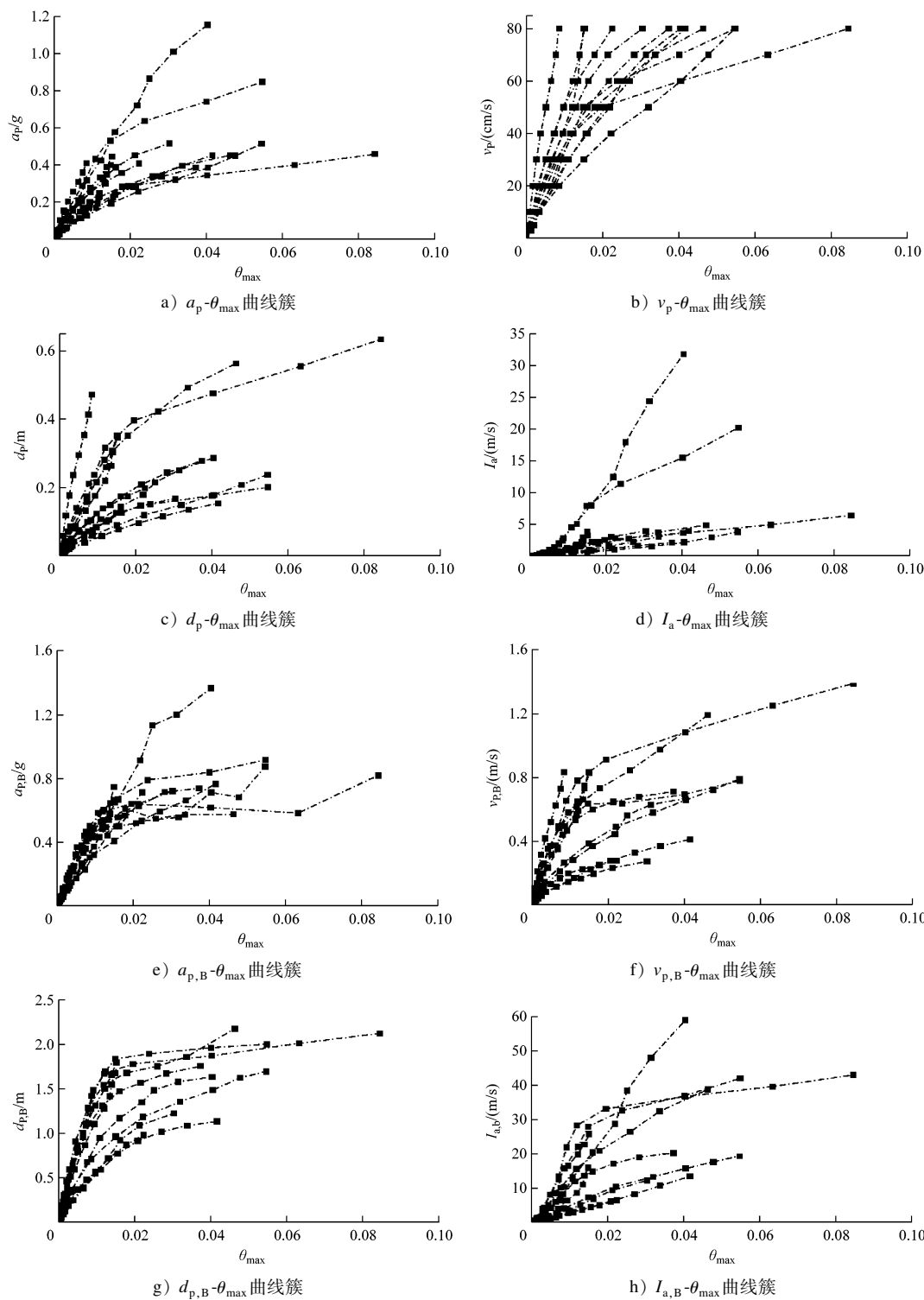


图4 不同IM对应的IDA曲线簇

Fig. 4 IDA curves corresponding to different IM

2.2 IM 的有效性评价

有效的 IM 应使同一 IM 下的 DM 取值离散性较小。IM 的有效性是确保 IDA 计算结果准确的关

键因素之一。如果 IM 有效性较好,可减少地震波数量需求,并使结构动力响应分析结果更准确^[11]。

图4中,不同IM对应的IDA曲线簇均包含了

大量数据,且不同地震波的 IDA 曲线存在差异。因此,采用数理统计方法对 IDA 曲线簇进行整理。首先,假定 DM 对 IM 的条件概率分布满足对数正态分布;然后,计算不同 IM 对应的 $\ln\theta_{\max}$ 标准差的平均值 A_{σ} 。 A_{σ} 较小者所对应的 IDA 曲线离散性较小,即此时的 IM 更有效。

按上述整理流程,得到不同 IM 对应的 A_{σ} ,如表 4 所示。由表 4 可知:相对于其它 IM, $a_{p,B}$ 的 A_{σ} 最小;与基岩输入处相比,地铁车站结构底部的 IM 离散性更小,说明结构底部的 IM 能更有效地反映地震动强度水平。可见,在对案例车站的结构 IDA 分析中 $a_{p,B}$ 更有效。此外,无论在基岩处,还是车站结构底部,与加速度峰值和速度峰值等指标相比,位移峰值和 Arias 强度的有效性均更低。

表 4 不同 IM 对应的 IDA 曲线离散性分析
Tab.4 Discreteness analysis of IDA curves with different IM

参数	A_{σ}	A_{σ} 相对值
v_p	0.470	1.00
a_p	0.485	1.03
d_p	0.626	1.33
I_a	0.637	1.36
$a_{p,B}$	0.270	0.57
$v_{p,B}$	0.505	1.07
$d_{p,B}$	0.459	0.98
$I_{a,B}$	0.444	0.94

注: A_{σ} 相对值为不同 IM 对应的 A_{σ} 与 v_p 对应的 A_{σ} 之比值。

3 结语

本文以上海某两层三跨地铁车站为研究案例,采用 ABAQUS 软件建立了车站结构和周围土体的二维有限元模型,得到了基岩处和车站结构底部不同 IM 对应的 IDA 曲线,通过 IM 有效性判定,得到以下结论:

- 1) 对同一组输入的地震动记录数据,不同 IM 对应的 IDA 曲线簇发展趋势基本相同,离散性不同。
- 2) 与基岩处相比,车站结构底部的 IM 更有效。其中, $a_{p,B}$ 对应的 IDA 曲线簇离散性最小。故 $a_{p,B}$ 为该站 IDA 中最有效的 IM。
- 3) 无论在基岩处,还是车站结构底部,与加速度峰值和速度峰值等指标相比,位移峰值和 Arias 强度的有效性均更低。

参考文献

[1] 董正方,刘淦之,曾繁凯,等. 基于修正 IDA 法的隧道地震易损性分析[J]. 振动与冲击,2021(17):106.
DONG Zhengfang, LIU Ganzhi, ZENG Fankai, et al. Seismic vulnerability analysis of tunnel based on modified IDA method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021(17):106.

[2] 梅贤丞,崔臻,盛谦. 近断层/远场地震动作用下隧道结构易损性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021(2):344.
MEI Xiancheng, CUI Zhen, SHENG Qian. Research on vulnerability of tunnel structures subjected to near-fault and far-field ground motions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021(2):344.

[3] LIU T, CHEN Z Y, YUAN Y, et al. Fragility analysis of a subway station structure by incremental dynamic analysis[J]. Advances in Structural Engineering, 2016,20:1111.

[4] 钟紫蓝,申铁尧,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(5):916.
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(5):916.

[5] ZHUANG H Y, YANG J, CHEN S, et al. Statistical numerical method for determining seismic performance and fragility of shallow-buried underground structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,116: 1.

[6] 钟紫蓝,申铁尧,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(3):486.
ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, ZHEN Libin, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020(3):486.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2016:20.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2016: 20.

[8] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]. California: Stanford University,1999.

[9] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database[DB/OL]. (2014-8-3)[2018-6-15]. <http://peer.berkeley.edu>.

[10] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31:491.

[11] TOTHONG P, LUCO N. Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007,36:1837.

(收稿日期:2021-12-21)