

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202005034

饱和砂土场地-地铁车站地震响应参数敏感性分析*

许民泽¹, 崔春义¹, 王广兵¹, 王启福², 苏健³, 高凌霞⁴

(1. 大连海事大学土木工程系, 辽宁大连 116026; 2. 大连海事大学安全工程系, 辽宁大连 116026; 3. 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 辽宁大连 116023; 4. 大连民族大学土木工程学院 辽宁大连 116600)

摘要:为进一步研究饱和砂土场地-地铁车站结构体系地震响应的参数敏感性问题,以某单层双跨地铁车站为研究对象,采用 $u-p$ 格式饱和两相介质有效应力动力求解方法,建立了饱和砂土场地-地铁车站结构体系耦合动力数值分析模型,选取土体剪切模量、渗透系数、内摩擦角和地震动强度作为敏感性影响参数,在基准值误差分析的基础上进一步开展灰色关联分析,得到了地震动响应影响因素的灰色关联度序列。计算分析结果表明:近场特征点动孔压比峰值对地震动强度和土体剪切模量的变化更为敏感,而加速度峰值对地震动强度和内摩擦角变化更为敏感,中柱上下端动剪力与动弯矩对内摩擦角和地震动强度的变化更为敏感。此参数敏感性分析流程方法,可为地铁车站抗震设计和减灾预测评估提供参考。

关键词: 饱和砂土; 地铁车站结构; 地震响应; 灰色关联分析

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0499-08

Parameter Sensitivity Analysis for Seismic Response of Subway Station Embedded in Saturated Sand Layers

XU Minze¹, CUI Chunyi¹, WANG Guangbin¹, WANG Qifu², SU Jian³, GAO Lingxia⁴

(1. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Department of Safety Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 3. Department of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 4. School of Civil Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China)

Abstract: In order to analyze the parameter sensitivity for the seismic response of subway station structures embedded in saturated sand layers, a numerical model of a one-story subway station with double spans in saturated sand layers is established based on the $u-p$ effective stress formulations of two-phase media. The shear modulus, permeability coefficient, internal friction angle, and ground motion intensity of surrounding soils are selected as sensitivity influential parameters. Moreover, combined with the fi-

* 收稿日期:2020-05-15;修回日期:2020-12-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51578100,51722801)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132019601)、近海与海岸工程国家重点实验室开放基金项目(LP1904)、“双一流”建设专项(CXXM2019BS008,SSCXXM017)资助

作者简介:许民泽(1995—),男,博士研究生。主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail:xuminze123@163.com

通讯作者:崔春义(1978—),男,教授,博导,博士。主要从事岩土地震工程与土动力方面的研究。

E-mail:cuichunyi@dlnu.edu.cn

ducial error analysis method, a grey correlation analysis is also carried out to obtain the grey correlation degree sequence of the corresponding seismic response. The computational results show that the peak excess pore pressure ratios at typical points of the near field are more sensitive to the ground motion intensity and the shear modulus of the surrounding soil, while the peak acceleration is more sensitive to the ground motion intensity and the internal friction angle of the surrounding soil. Besides, the dynamic bending moment and shear force of the middle pillar are more sensitive to the ground motion intensity and the internal friction angle of the surrounding soil. This presented procedure of the parameter sensitivity analysis for the seismic response of subway stations embedded in saturated sand layers can provide a reference for seismic design of subway station structure as well as a prediction for disaster prevention.

Keywords: saturated sand; subway station structure; seismic response; grey correlation analysis

引 言

近年来,我国大力发展城市地下轨道交通事业,地铁车站等结构开始大规模建设,城市地铁发展正处于高峰期。我国属于地震多发国家,且饱和砂土分布广泛,而地震作用下的饱和砂土层中地铁车站结构动力响应复杂,其抗震性能也往往受到多种因素的影响^[1-5]。2019年全国已建地铁车站有3 480多座,多数还未曾遭受地震的检验^[6]。因此,开展饱和砂土地-地铁车站结构体系地震动力响应的参数敏感性分析,对地铁车站结构防震减灾及抗震设计等方面具有重要的指导作用和实践意义。

目前,在地铁车站结构地震响应影响因素的分析方面,刘华北等^[7]探究了在水平地震动作用下,埋深对饱和砂土地中地铁车站结构上浮效应、加速度响应、水平位移和结构内力等动力响应的规律。汪明武等^[8]采用基于多重剪切本构塑性模型和液化前缘面的有效应力分析方法,分析了不同地震动强度下饱和砂土地中地铁车站结构内力及场地超孔压的变化规律。李建波等^[9]在考虑土-结构相互作用的基础上,探讨了地基弹性模量、结构弹性模量及场地硬夹层对软土地中浅埋地铁车站结构地震动力响应的影响。李伟华等^[10]研究了软弱饱和土夹层的位置及厚度对地震作用下地铁车站结构内力的影响规律。赵源等^[11]考虑土-结构接触面效应和场地初始静应力,采用动力松弛法探讨了不同地震动入射角度对地铁车站结构动力响应的影响。姚小彬等^[12]基于ABAQUS软件,采用拟静力法研究了在地震作用下土层刚度对地铁车站结构位移的影响规律。陶连金等^[13]基于FLAC^{3D}数值计算平台分析了竖向地震动作用对地铁车站

结构相对水平位移、竖向位移及结构应力的影响规律。H.Y.Zhuang等^[14]基于振动台实验,研究了地震作用下不同场地液化程度对地铁车站结构地震动力响应的影响规律。L.Li等^[15]基于ABAQUS软件,分析了地震作用下不同埋深条件的饱和软土中地铁车站结构内力变化规律。J.L.Hu等^[16]采用有限元与有限差分(FE-FD)耦合方法,分析了埋深及土体相对密度对饱和砂土地-地铁车站结构体系的场地液化程度及结构上浮效应的影响规律。路德春等^[17]以地铁车站的层间位移角为评价指标,探讨了相对刚度、相对埋深以及土与结构接触面的摩擦系数对地铁车站结构地震动力响应的影响。C.Xia等^[18]同样以层间位移角为指标,研究了地震动强度及土与结构相对刚度对地铁车站结构地震动力响应的影响。

然而,上述研究中多采用控制变量法探讨地震响应随单一变量变化的关系,未深入考虑多因素之间的耦合关联性,难以定量描述地震响应对各影响因素的敏感程度,而针对饱和砂土地-地铁车站结构体系多因素敏感性研究很少见。因此,本文将某单层双跨地铁车站为研究对象,采用 $u-p$ 格式饱和两相介质有效应力动力求解方法,建立饱和砂土地-地铁车站结构动力相互作用体系数值计算模型,在完全耦合有效应力动力数值分析基础上,进行饱和砂土地-地铁车站结构体系地震动力响应的基准值误差和灰色关联分析。

1 数值模型与灰色关联分析法

基于OpenSees开源程序平台,建立饱和砂土地-地铁车站结构体系数值计算模型。模型尺寸为 $170\text{ m}\times 30\text{ m}$,土体单元采用可以模拟固液完全耦合

的quadUP四节点单元;饱和砂土地体的土体材料本构模型采用Z.H.Yang等^[19-21]修正的多屈服面塑性本构模型,即PDMY模型;地铁车站结构单元采用可以考虑钢筋混凝土非线性变形的纤维截面梁单元^[22],并使中柱配筋率为1.5%,其他截面配筋率为1.2%,钢筋混凝土本构模型如图1所示。

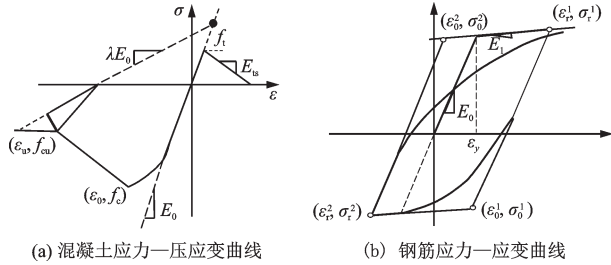


图1 钢筋混凝土本构模型
Fig.1 Constitutive model of reinforced concrete

图1(a)中 ϵ_0 、 f_c 分别为混凝土峰值压应变和混凝土轴心抗压强度, ϵ_{cu} 、 f_{cu} 分别为混凝土极限压应变和混凝土极限抗压强度, E_0 、 E_{ts} 分别为混凝土初始弹性模量和混凝土受拉软化段斜率, f_t 为混凝土抗拉强度, λ 为极限压应变处卸载斜率和初始弹性模量处斜率的比值;图1(b)中 ϵ_0 、 σ_0 分别为包络线屈服点处钢筋的应变和应力, ϵ_r 、 σ_r 分别为包络线反向点处钢筋的应变和应力, ϵ_y 为屈服应变, E_0 、 E_1 分别为钢筋初始弹性模量和钢筋硬化刚度。纤维截面如图2所示。

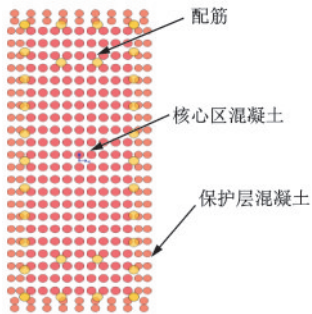


图2 纤维截面示意图
Fig.2 Schematics of fiber cross section

在动力计算过程中,不考虑地铁车站结构与土体之间的滑移、脱离;模型左右两侧为捆绑边界^[23],底部采用固定约束边界;地表为排水条件。地铁车站结构横截面尺寸及有限元模型如图3~4所示。

土体具有非均匀性、多相性、碎散性,此外考虑土体参数测定不确定性和地震动随机性,场地本身属于灰色系统。因此,本文以邓氏灰色关联分析模型为基础,通过求解影响因素的关联度序列来开展

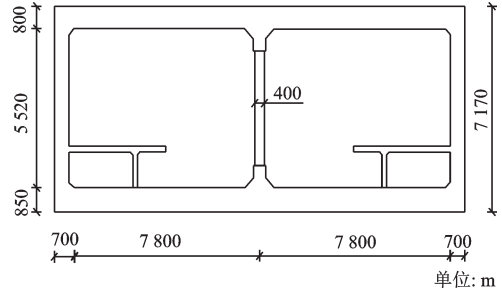


图3 地铁车站结构横截面
Fig.3 Cross section of subway station structure

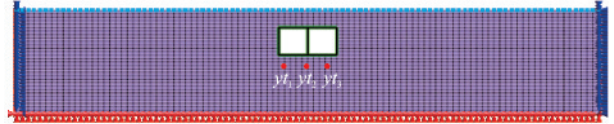


图4 数值模型
Fig.4 Numerical model

灰色关联分析^[24-27]。在参数矩阵与目标矩阵中,由于各参量间物理意义不同,导致相应数据存在较大差异,为方便计算需进行无量纲化处理:

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j)}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_i(j)} \quad (1)$$

$$y'_i(j) = \frac{y_i(j)}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_i(j)} \quad (2)$$

式中, m 为矩阵的总列数; $x_i(j)$ 、 $y_i(j)$ 分别为参数矩阵元素与目标矩阵元素; $x'_i(j)$ 、 $y'_i(j)$ 分别为无量纲参数矩阵元素与无量纲目标矩阵元素。其中, i 代表矩阵行数,文中取值为1、2、3、4; j 代表矩阵列数,文中取值为1、2、3、4、5。

基于式(1)、(2)构建差异信息序列:

$$\Delta_{ij} = |x'_i(j) - y'_i(j)| \quad (3)$$

则灰色关联系数矩阵元素可表示为:

$$\gamma_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \delta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \delta \Delta_{\max}} \quad (4)$$

式中, δ 为分辨系数,取值区间为 $[0, 1]$,本文中取0.5, Δ_{\max} 和 Δ_{\min} 为差异信息空间矩阵的极大值与极小值。

进一步地,得到各参数关联度为:

$$A_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \quad (5)$$

参数关联度量化了地震动力响应对参数矩阵中不同参数的敏感性,其取值区间为 $[0, 1]$ ^[28]。

具体选取土体的剪切模量、渗透系数、内摩擦角和地震动强度作为影响参数,影响参数基准值及

变化范围见表1。其中,地震波输入为EL-Centro波,如图5所示。

表1 敏感性影响参数分布情况

Table 1 Distributions of sensitivity influential parameters

参数	基准值	参数变化范围
剪切模量/kPa	$G_0=7.5 \times 10^4$	$(0.6 \sim 1.4)G_0$
内摩擦角/(°)	$\varphi_0=33$	$(0.6 \sim 1.4)\varphi_0$
渗透系数/($m \cdot s^{-1}$)	$k_0=1 \times 10^{-4}$	$(0.6 \sim 1.4)k_0$
地震动强度/g	$PGA_0=0.2$	$(0.6 \sim 1.4)PGA_0$

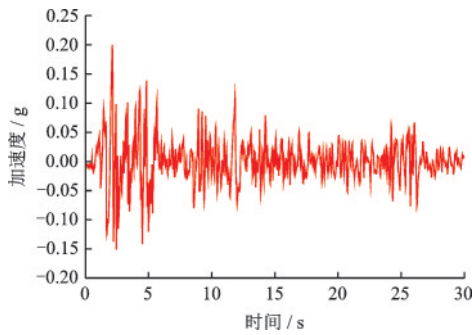


图5 EL-Centro波时程曲线

Fig.5 Acceleration time-history curve of EL-Centro earthquake wave

2 基准值误差与灰色关联分析

通过控制某一参数单独变化,其他参数取基准值,对17组工况饱和砂土地-地铁车站结构体系进行非线性动力时程分析,得到不同参数变化时场地中不同特征点动孔压比峰值、加速度峰值及地铁车站结构特征截面内力,并采用基准值误差分析各参数与地震动力响应间的关系。

具体地,选取场地近场特征点 y_{t1} (节点1463)、 y_{t2} (节点1465)、 y_{t3} (节点1467),得出动孔压比峰值和加速度峰值基准值误差曲线分别如图6~7所示。如图6所示,近场特征点动孔压比峰值与渗透系数呈负相关,与剪切模量、地震动强度呈正相关,而与内摩擦角呈非单调关联关系。如图7所示,内摩擦角和地震动强度对近场特征点加速度峰值影响较为显著,加速度峰值与内摩擦角、地震动强度呈明显正相关关系,与剪切模量和渗透系数的相关性不明显。

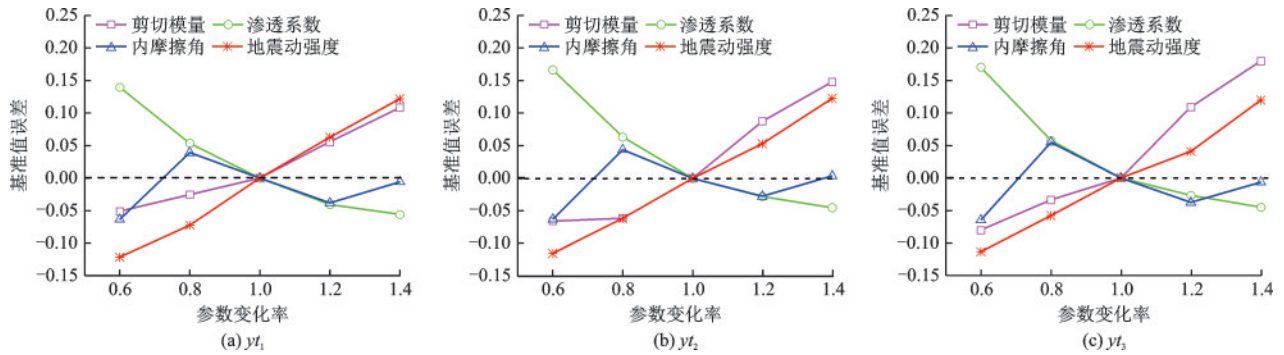


图6 动孔压比峰值基准值误差曲线

Fig.6 Fiducial error curves of peak excess pore pressure ratios

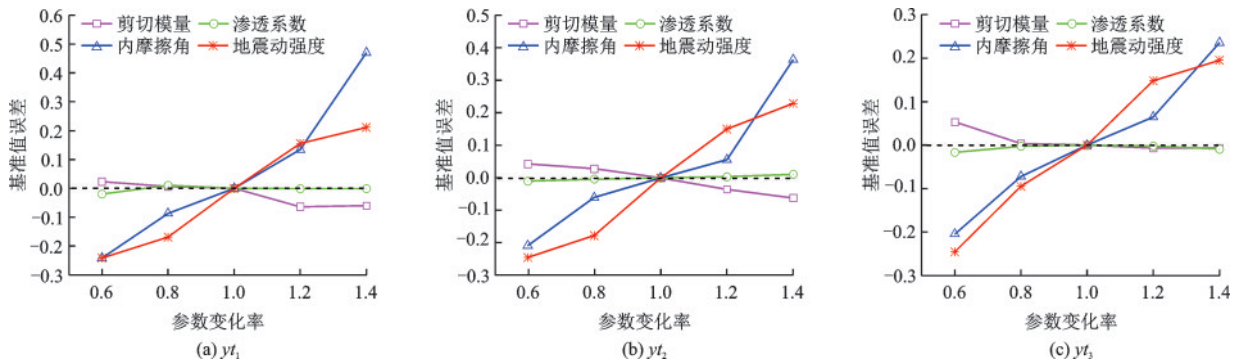


图7 加速度峰值基准值误差曲线

Fig.7 Fiducial error curves of peak accelerations

为分析影响参数变化对地铁车站结构动内力的影响,进一步选取车站结构中柱特征截面的动内力(弯矩、剪力、轴力)进行基准值误差分析,特征截面位置如图8所示。图9为中柱特征

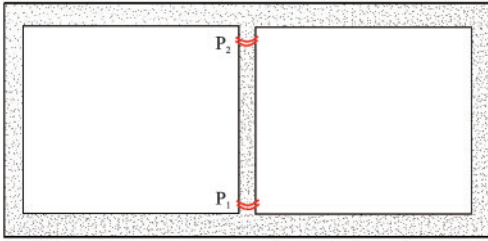


图8 特征截面示意图

Fig.8 Schematic diagram of the characteristic cross-section

截面(上下端)动内力基准值误差曲线。中柱特征截面动内力与内摩擦角、地震动强度呈显著正相关关系,与剪切模量则呈负相关关系,而对渗透系数的变化最为不敏感,其基准值误差值接近于0。

图10为场地特征点的动孔压比峰值灰色关联度及加速度峰值关联度情况。近场特征点动孔压比峰值关联度、加速度峰值关联度与特征点位置关系不大。动孔压比峰值关联度均值序列为:地震动强度>剪切模量>内摩擦角>渗透系数,加速度峰值关联度均值序列为:地震动强度>内摩擦角>渗透系数>剪切模量。

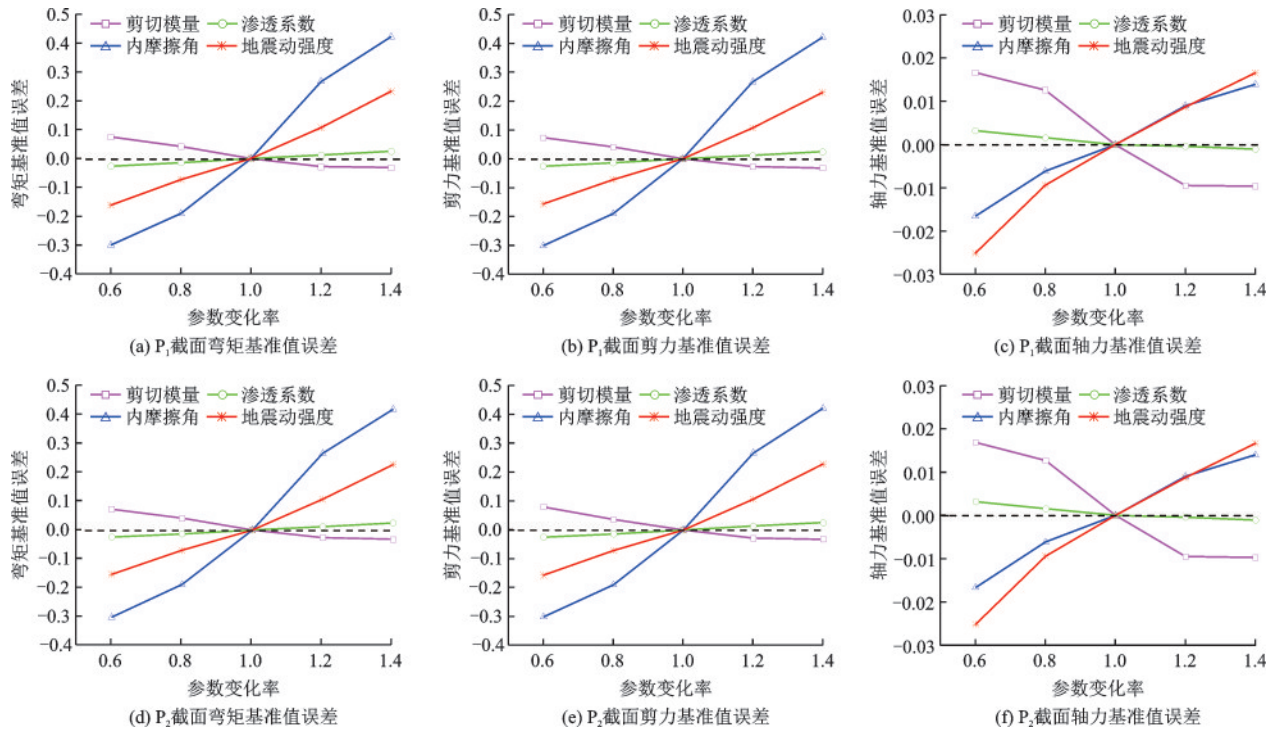


图9 特征截面动内力基准值误差曲线

Fig.9 Fiducial error curves of characteristic cross-section internal force

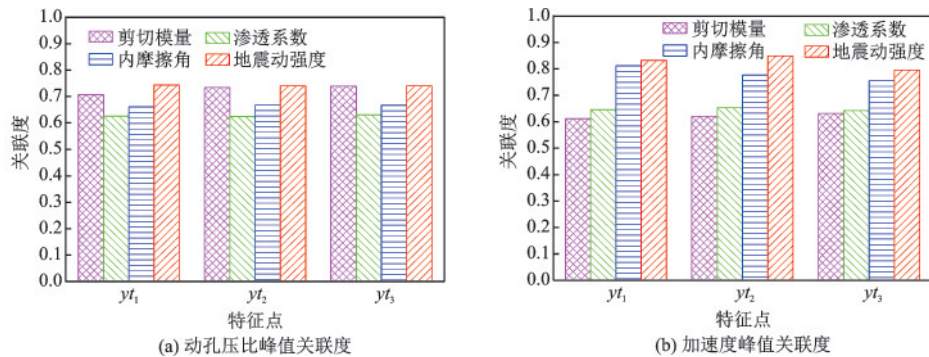


图10 场地特征点关联度柱状图

Fig.10 Gray correlation degree histogram of characteristic points

图 11 为地铁车站结构中柱特征截面的灰色关联度情况。中柱特征截面动剪力和动弯矩灰色关联度序列分布情况为:内摩擦角>地震动强度>渗透系数>剪切模量。

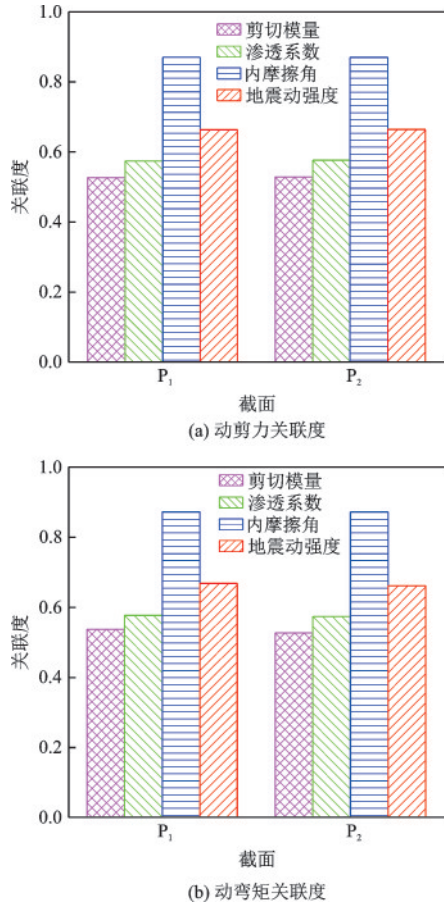


图 11 结构特征截面关联度柱状图

Fig.11 Gray correlation degree histogram of characteristic cross-sections of the structure

3 结 论

以某单层双跨地铁车站为研究对象,采用 $u-p$ 格式饱和两相介质有效应力动力求解方法,建立饱和砂土地-地铁车站结构动力相互作用体系数值计算模型,在完全耦合有效应力动力数值分析基础上,进行饱和砂土地-地铁车站结构体系地震动力响应的基准值误差和灰色关联分析,计算分析结果表明:

(1) 近场特征点动孔压比峰值灰色关联度序列为:地震动强度>土体剪切模量>内摩擦角>渗透系数,其对地震动强度和土体剪切模量的变化更为

敏感;加速度峰值的关联度序列为:地震动强度>内摩擦角>渗透系数>土体剪切模量,其对地震动强度和内摩擦角变化更为敏感。

(2) 中柱上下端作为地铁车站典型不利位置,其特征截面动剪力与动弯矩的灰色关联度序列均为:内摩擦角>地震动强度>渗透系数>剪切模量,动剪力与动弯矩对内摩擦角和地震动强度变化相对更为敏感。

(3) 综合 $u-p$ 格式饱和两相介质有效应力动力求解、基准值误差和灰色关联分析法,本文所提出的饱和砂土地-地铁车站结构体系地震动力响应参数敏感性分析流程方法,可为地铁车站抗震设计和减灾预测评估提供参考。

参考文献:

- [1] 刘汉龙, 王维国, 刘军, 等. 饱和砂土地大型爆炸液化现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 601-608.
Liu H L, Wang W G, Liu J, et al. Large-scale field tests of blast-induced liquefaction in saturated sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 601-608. (in Chinese)
- [2] 张意江, 陈育民, 王维国, 等. 爆炸液化场地中浅埋钢筋混凝土结构动力响应的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3506-3512.
Zhang Y J, Chen Y M, Wang W G, et al. Experimental investigation on dynamic response of shallow-buried reinforced concrete structure in blast-induced liquefied sandy foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3506-3512. (in Chinese)
- [3] 付海清, 袁晓铭, 王森. 基于现场液化试验的饱和砂土孔压增量计算模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1611-1618.
Fu H Q, Yuan X M, Wang M. An incremental model of pore pressure for saturated sand based on in-situ liquefaction test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1611-1618. (in Chinese)
- [4] 姜龙, 杨仕升, 谢开仲. 城市地下综合管廊节点地震响应的影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 862-868.
Jiang L, Yang S S, Xie K Z. Influencing factors analysis for node seismic response of underground utility tunnel in urban area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 862-868. (in Chinese)

- Chinese)
- [5] 杨喻声,禹海涛,袁勇.地下结构抗震分析中若干土层模拟方法对比研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(2):244-249,257.
Yang Y S, Yu H T, Yuan Y. Comparative study on several soil ground simulation schemes in seismic analysis of underground structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 244-249,257. (in Chinese)
- [6] 白旭,唐小微,胡记磊.浅埋地铁车站的抗液化上浮改进措施数值分析[J].防灾减灾工程学报,2019,39(5):778-786,878.
Bai X, Tang X W, Hu J L. Numerical analysis of anti-liquefaction uplift of a shallow buried subway station in improved countermeasures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 778-786,878. (in Chinese)
- [7] 刘华北,宋二祥.埋深对地下结构地震液化响应的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(3):301-305.
Liu H B, Song E X. Effects of burial depth on the liquefaction response of underground structures during an earthquake excitation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(3): 301-305. (in Chinese)
- [8] 汪明武,李丽.液化场地浅埋钢筋混凝土结构物变形及动土压力分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增):3374-3380.
Wang M W, Li L. Analysis of deformations of shallow-buried reinforced concrete structure and dynamic earth pressures in liquefiable soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Sup): 3374-3380. (in Chinese)
- [9] 李建波,陈健云,李静,等.软土浅埋地铁车站地震响应的多因素影响分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):193-199.
Li J B, Chen J Y, Li J, et al. Multi-factor influencing analysis on the seismic responses of subway station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2):193-199. (in Chinese)
- [10] 李伟华,赵成刚,杜楠馨.软弱饱和土夹层对地铁车站地震响应的影响分析[J].岩土力学,2010,31(12):3958-3963.
Li W H, Zhao C G, Du N X. Analysis of effects of saturated soft interlayer on seismic responses of metro station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3958-3963. (in Chinese)
- [11] 赵源,杜修力,李立云.地震动入射角度对地下结构地震响应的影响[J].防灾减灾工程学报,2010,30(6):42-48.
Zhao Y, Du X L, Li L Y. The effect of obliquely incident seismic waves on dynamic response of underground structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(6): 42-48. (in Chinese)
- [12] 姚小彬,戚承志,罗健.土-结构相对刚度对地下矩形结构地震反应影响规律的研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(3):93-96.
Yao X B, Qi C Z, Luo J. Effect of relative stiffness on seismic response of underground rectangular structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(3): 93-96. (in Chinese)
- [13] 陶连金,李积栋,吴秉林,等.竖向地震动对大跨度高断面Y形柱地铁车站地震响应分析研究[J].地震工程学报,2015,37(3):17-23.
Tao L J, Li J D, Wu B L, et al. Influence of the vertical seismic wave on the seismic response of a large-span high-section y-shaped column subway station [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 17-23. (in Chinese)
- [14] Zhuang H Y, Chen G X, Hu Z H, et al. Influence of soil liquefaction on the seismic response of a subway station in model tests [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2016, 75(3):1169-1182.
- [15] Li L, Shi P X, Du X L, et al. Using numerical simulation to determine the seismic response of coastal underground structures in saturated soil deposits [J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(3): 583-595.
- [16] Hu J L, Liu H B. The uplift behavior of a subway station during different degree of soil liquefaction [J]. Procedia Engineering, 2017, 189(1): 18-24.
- [17] 路德春,冯科伟,杜修力.土体约束特性对地下结构地震反应的影响研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):591-598.
Lu D C, Feng K W, Du X L. Study on the seismic response of underground structures considering the constraint of surrounding soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 591-598. (in Chinese)
- [18] Xia C, Qi C, Zhao B, et al. Seismic response of the

- subway station due to a specific active fault [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 85: 12-20.
- [19] Yang Z H. Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction [D]. New York, US: Columbia University, 2000.
- [20] Yang Z H, Elgamal A, Parra E. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1119-1127.
- [21] Elgamal A, Yang Z H, Parra E, et al. Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(6):883-905.
- [22] 赵冬冬. 城市地铁地下结构地震反应的试验研究与数值模拟[D].北京:清华大学, 2013.
Zhao D D. Experimental study and numerical simulation on seismic response of urban underground subway structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.(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 Z L, Shen Y Y, Hao Y R, et al. Seismic fragility analysis of two-story-three-span metro station structures based on IDA method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 916-924. (in Chinese)
- [24] 汪洋, 殷坤龙, 安关峰. 滑坡敏感因子的灰色关联分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(1):91-93.
Wang Y, Yin K L, An G F. Grey correlation analysis of sensitive factors of landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1):91-93. (in Chinese)
- [25] 姜德义, 谢圣纲, 任松, 等. 利用灰色关联度预测重庆地区边坡稳定性[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4):665-667.
Jiang D Y, Xie S G, Ren S, et al. Prediction of slope stability in chongqing area by gray incidence degree [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4):665-667. (in Chinese)
- [26] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1):115-122.
Tan X H, Wang J G, Liu X R, et al. Finite element reliability computation and sensitivity analysis of slope stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1):115-122.(in Chinese)
- [27] 王俊卿, 李靖, 李琦, 等. 黄土高边坡稳定性影响因素分析——以宝鸡峡引水工程为例[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2114-2118.
Wang J Q, Li J, Li Q, et al. Analysis of influence factors of high slope stability of loess: Taking the Baojixia water division project for example [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2114-2118. (in Chinese)
- [28] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2005.
Deng J L. Theory of grey system [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)