

周强,陈斯,汪云龙,等,可液化粉土地层地铁车站结构地震响应分析[J].地震工程学报,2024,46(6):1331-1344.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220903001

ZHOU Qiang, CHEN Si, WANG Yunlong, et al. Seismic response of subway station structure in liquefiable silt layer[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1331-1344. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220903001

可液化粉土地层地铁车站结构地震响应分析

周强¹, 陈斯^{2,3}, 汪云龙^{4,5}, 赵继辉^{2,3}, 周海祚^{2,3}, 郑刚^{2,3}

- (1. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;
4. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
5. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 地震作用下地铁车站结构破坏一直是学术界广为关注的问题。受河流冲积和海水侵蚀等沉积环境影响,天津地区可液化粉土地层分布广泛,粉土液化会对地铁车站结构产生影响,但影响程度尚不清楚。目前,平行布置的地铁车站群作为典型交通枢纽,在城市建设中越来越普遍,车站群中临近双车站的抗震问题亟待研究。通过三轴试验研究黏粒含量对粉土静、动力特性的影响,基于塑性边界本构模型 PM4Silt 标定中不同黏粒含量粉土模型参数及基于有限差分分析,阐明低黏粒含量土层对地铁车站动力响应的不利影响,为可液化粉土地层车站选址提供建议;通过参数分析研究车站间距对临近车站相互作用的影响,揭示临近车站相互作用的影响范围,提供最优车站间距参考值。该研究可为临近车站设计提供理论依据。

关键词: 三轴试验; 边界面模型; 可液化粉土; 临近地铁车站

中图分类号: P319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1331-14

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220903001

Seismic response of subway station structure in liquefiable silt layer

ZHOU Qiang¹, CHEN Si^{2,3}, WANG Yunlong^{4,5}, ZHAO Jihui^{2,3}, ZHOU Haizuo^{2,3}, ZHENG Gang^{2,3}

(1. China Construction Infrastructure Corp., Ltd., Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

5. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: The structural damage of subway stations under earthquakes has been a widespread issue. Affected by the sedimentary environment, such as river alluvium and seawater erosion, liquefiable silt layers are widely distributed in the Tianjin area. Silt liquefaction exerts an influence on subway station structure, but the degree of this influence is unclear. As standard transportation hubs, parallel subway station systems are becoming increasingly common in urban areas,

收稿日期: 2022-09-03

基金项目: 中建基础科技研发课题(CSCIC-2020-KT-01); 中建股份科技研发计划资助(CSCEC-2021-Z-25); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021D39)

第一作者简介: 周强, 博士, 工程师, 主要从事地下工程工作。E-mail: qiangzhou.hit@hotmail.com。

and thus, the seismic problem of adjacent stations in a station group needs to be studied urgently. The influence of fine content on the static and dynamic characteristics of silt was studied with a triaxial test. The parameters of a silt model with varying fine content were calibrated using the bounding surface plastic constitutive model PM4Silt. Through finite difference analysis, the adverse effect of soil layer with low fine content on the dynamic response of a subway station was clarified. The results provided insights for the site selection of stations in a liquefiable silt layer. In addition, the influence of station spacing on the interaction between adjacent stations was studied through parametric analysis. The influence of the interactions between adjacent stations was revealed, and the reference value of optimal station spacing was provided. This study can provide a theoretical basis for the design of adjacent stations.

Keywords: triaxial test; bounding surface model; liquefiable silt; adjacent subway stations

0 引言

地铁作为城市交通系统的重要组成部分,在当代社会发挥重要作用。由于我国受多条地震带影响,地铁建设不可避免地穿越高烈度地区。人类建设地下结构历史较短,因此在过去很长时间内普遍认为地下结构在地震中难以破坏。1995年阪神地震使地铁系统遭受毁灭性冲击,说明地下结构损坏具有难以观测和修复困难的特点,会造成更大的经济损失。

强震作用下,地下结构周围土层发生液化,会对地下结构造成不利影响。目前统一的观点是,砂土易发生液化,黏土不发生液化,黏粒含量介于二者之间的“中间土”——粉土,液化特性介于二者之间^[1]。国内外学者对于粉土液化进行了广泛研究,得出了许多有益的结论^[2-4]。汪闻韶^[5]提出可以通过塑性指数对粉土进行判别。Yamg等^[6]和Zhou等^[7]阐述了通过试验确定粉土液化趋势的方法。Vucetic等^[8]总结了大量试验结果,得出粉土液化特性与不排水抗剪强度有关。这些研究阐述了粉土液化特性的判别和影响因素,但是关于不同黏粒含量对于粉土静、动力特性影响的研究尚不充分。

阪神地震后,部分学者展开了地下结构抗震研究^[9-10]。曹炳政等^[11]利用FLUSH程序进行了阪神地震中Dakai车站数值分析。刘晶波等^[12]和凌道盛等^[13]通过离心机模型试验研究了可液化土层中地铁车站的破坏机理。赵源等^[14]基于ANSYS数值软件,研究了地震动入射角度对地下结构动力反应的影响。Lee等^[15]以韩国明挖法地铁车站的三种主要形式为背景,采用SAP2000软件分析了地震荷载下车站结构的破坏模式。Zhuang等^[16]开展了可液化土层中地下结构的振动台试验,研究了地震

作用下地下结构的残余应变。Zhou等^[17-18]基于MARS算法得出隧道结构上浮位移计算公式,并基于FLAC有限差分程序分别提出评价矩形隧道上浮位移与结构埋深和断面面积的计算公式。Yang等^[19]进行了位于粉质黏土和淤泥质黏土中盾构隧道的离心机振动台试验,研究了加速度放大和隧道内力规律。众多分析表明,地下结构动力响应主要与土层施加在结构上的强制位移相关,影响动力响应的因素主要有结构埋深、地震动特性、地基土性质和土-结构接触关系等。

随着新建地下结构不断增多,地下结构群的出现越来越普遍,该体系抗震研究逐渐提上日程^[20-22]。姜忻良等^[23]提出一种三维有限元和无限元的耦合方法,分析交叉隧道三维地震响应,说明了耦合方法在动力分析中的优越性。Parvanova等^[24]研究了地表地形对双孔隧道地震响应的影响,分析了隧道参数对体系地震响应的影响。Zheng等^[25]基于FLAC有限差分程序,分析了砂土地层双隧道结构的上浮位移。陶连金等^[26]建立了隧道密贴下穿既有地铁车站为模型,分析了其在竖向强震作用下的响应,发现动力响应与输入地震波特性有关。李积栋等^[27]以北京地铁换乘车站为背景,基于FLAC^{3D}有限差分程序,探究了非液化土密贴交叉上下两车站结构的相互作用。Li等^[28]研究了结构形式对换乘车站动力响应的影响,并证明了传统地基处理方法对换乘车站的适用性。目前针对双车站体系的研究主要针对换乘车站,对临近车站的研究较少。

上述研究主要针对单一地下结构和砂土地层或非液化地层中地下结构群的动力响应,对可液化粉土地层地下结构的研究较少,不同黏粒含量可液化粉土地层中地下结构的地震响应研究亟需开展。鉴

于此,本文通过不同黏粒含量粉土三轴试验,阐明黏粒含量对粉土静、动力特性的影响,标定不同黏粒含量粉土本构模型参数,在此基础上依托 FLAC^{2D} 有限差分软件研究可液化粉土层单一地铁车站结构及临近双地铁车站结构地震响应。

1 数值模型概况

1.1 不同黏粒含量粉土三轴试验与本构模型标定

Price^[29]研究表明,混合典型砂性土和黏性土可以获得不同塑性指数的土样,能有效反映介于砂土和黏土之间的“中间土”的性质。随高岭土含量增加,土样的黏粒含量逐渐增加,土样的分类从砂土过渡到粉质黏土、黏质粉土和黏土,本文对两种不同黏粒含量粉土进行了三轴试验。试验配比参照文献[30],分别为 20%高岭土+80%石英粉(以下简称 80S20K)和 70%高岭土+30%石英粉(以下简称 30S70K)。100S 代表土材料全部为石英粉,100K 代表土材料全部为高岭土。两种粉土的基本物理性质如表 1 所列。通过颗粒分析试验获取两种粉土的颗粒级配曲线,如图 1 所示。可以看出不同配比土的黏粒含量呈现从砂性土到黏性土的过渡性质。

表 1 不同配比粉土物理性质

Table 1 Physical properties of silt with different proportions

混合物配比	干密度/(g/cm ³)	孔隙比
30S70K	1.503	0.83
80S20K	1.303	1.12

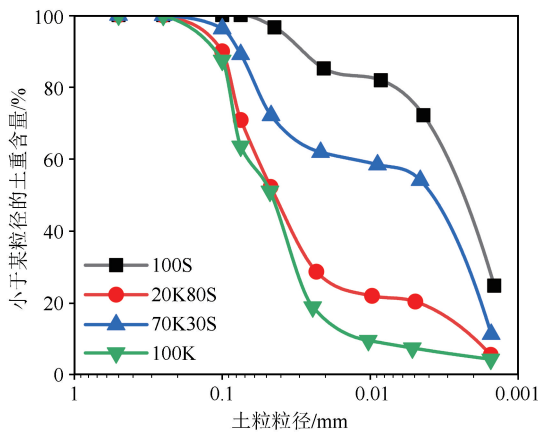


图 1 不同配比土颗粒级配曲线

Fig.1 Particle grading curve of soil with different proportions

两种不同黏粒含量粉土采用 Boulanger 等^[31]提出的 PM4Silt 模型进行模拟。该模型是一种基于边界模型修正的新型本构模型,可以较好模拟粉土和低塑性黏土在循环荷载下的力学特性。模型参数通过三轴试验进行标定。三轴试验工况如表 2 所

列,试验结果如图 2 所示。

表 2 不同黏粒含量粉土三轴试验设计

Table 2 Triaxial test design of silt with different clay contents

试验项目	混合物配比	试验工况
静三轴试验	30S70K	围压:100 kPa(两组平行试验)
	80S20K	围压:100 kPa(两组平行试验)
动变形试验	30S70K	围压:50 kPa、100 kPa、200 kPa
	80S20K	围压:50 kPa、100 kPa、200 kPa
动强度试验	30S70K	围压:100 kPa(CSR=0.16、0.21、0.26)
	80S20K	围压:100 kPa(CSR=0.19、0.25、0.30)

PM4Silt 模型包括 6 个主要参数和 20 个次要参数,其中有 3 个主要参数需要用户自定义,分别为不排水剪切强度比 $s_{u,cs,eq}/\sigma'_{vc}$ 、剪切模量系数 G_0 和体积收缩率 h_{p0} 。不排水剪切强度比 $s_{u,cs,eq}/\sigma'_{vc}$ 用来定义单元临界状态,通过式(1)~式(3)决定。最大剪切模量 G_{max} 由剪切模量系数 G_0 通过式(3)控制。

$$p' = \frac{2s_{u,cs}}{M} \tag{1}$$

$$s_{u,cs} = F_{su} \cdot s_{u,cs,eq} \tag{2}$$

$$G_{max} = G_0 p_A \left(\frac{p}{p_A} \right)^{n_G} \tag{3}$$

式中: M 为临界应力线斜率; F_{su} 为不排水剪切强度衰减系数; p_A 为标准大气压; p 为土样围压; n_G 为剪切模量指数。

体积收缩率 h_{p0} 是影响单元抗液化强度的参数,通过式(4)~式(5)影响单元的剪胀系数 D ,继而影响抗液化强度。调整体积收缩率可以仅改变塑性剪应变而不改变剪应力,使单元达到所需要的循环抗力比。

$$D = \frac{A_{d0}}{h_p} \cdot [(\alpha - \alpha_{in}^{app}) : n + C_{in}]^2 \frac{(\alpha^d - \alpha) : n}{(\alpha^d - \alpha) : n + C_D} \tag{4}$$

$$h_p = h_{p0} \cdot \exp\left(-0.7 + 0.2 \left[3 - \frac{\xi}{\lambda} \right]^2\right) \tag{5}$$

式中: A_{d0} 为剪胀参数; h_p 为体积收缩参数; h_{p0} 为体积收缩率; n 为屈服面单位法向量; α 为偏应力比张量; α^d 为剪胀偏应力比张量; α_{in}^{app} 为偏应力比张量初始值; λ 为平面压缩系数; C_{in} 和 C_D 为拟合常数。

Boulanger 等^[31]提出了一种迭代调整模型参数的标定方法,按照该方法标定了两种不同黏粒含量粉土的模型参数,结果如表 3 所列。根据表中的模型参数,在 FLAC 中建立 1 m(长)×1 m(宽)的土体单元进行单元试验。单元试验和动三轴试验的动剪切应力比-破坏振次曲线、剪应力-剪应变曲线如图 2 所示。单元试验和动三轴试验拟合良好,说明模型参数标定合理。

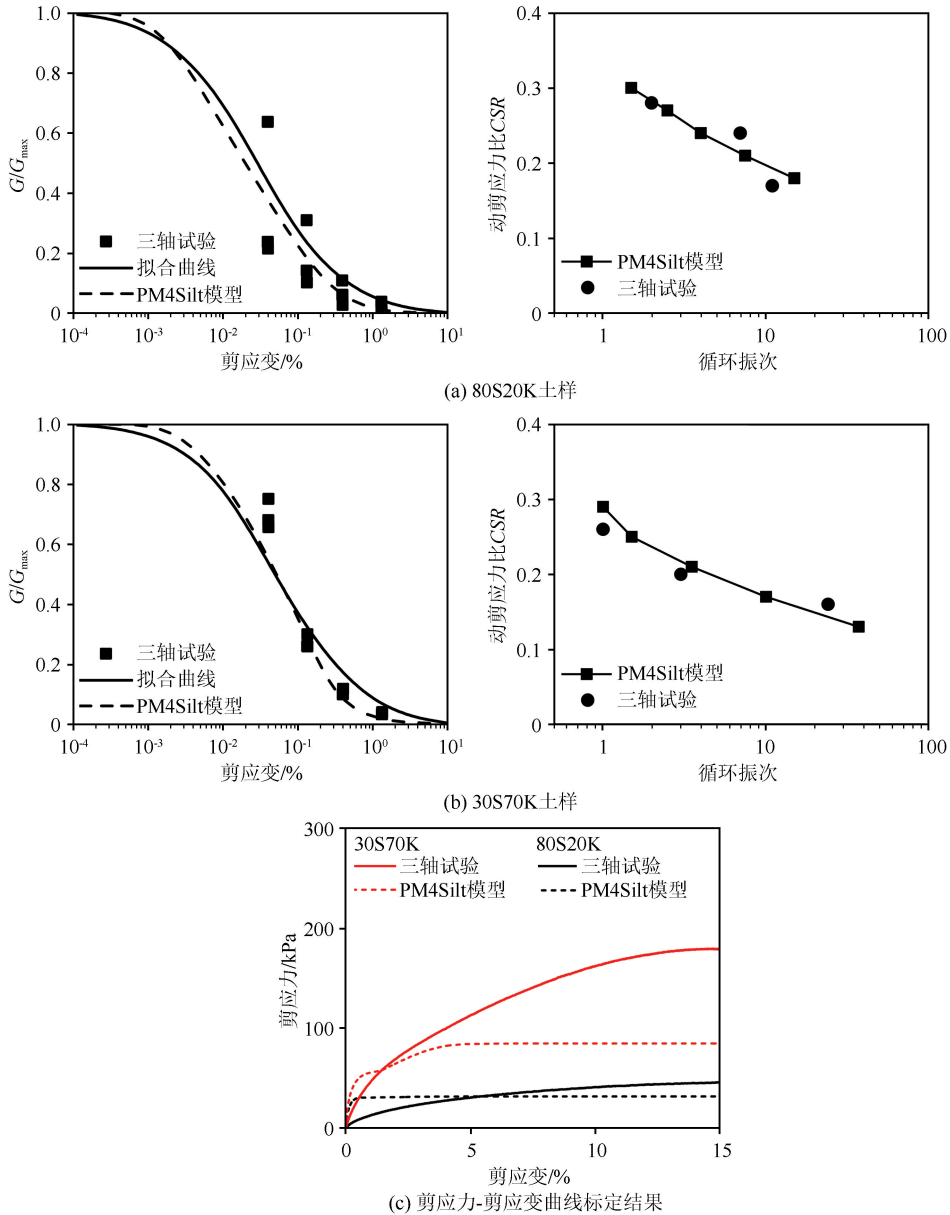


图2 动三轴试验标定结果

Fig.2 Calibration results of dynamic triaxial tests

1.2 数值模型

单层浅埋地铁车站是一种经济实用的车站形式,应用较为广泛,且延伸长,可作为平面应变问题考虑^[21]。本研究选取天津地铁2号线鼓楼站作为研究对象。该结构由顶底板、侧墙、中柱三部分组成,其中中柱间距3.5 m。地铁车站横截面尺寸及顶底板、侧墙、中柱的截面尺寸如图3所示。根据《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》的要求,侧向边界宜取至离结构边墙至少3倍宽度处,底部边界取至基岩表面^[32]。考虑到后续双车站分析的需要,有限差分模型的水平向长度为300 m,竖向深度为44 m。地铁车站顶板埋深4.8 m,地下水位位于

地表,地表为透水边界。车站结构为钢筋混凝土结构,采用FLAC软件中结构单元进行模拟,本构模型采用弹性模型简化,实际工程采用C30混凝土,弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.2$,密度 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ 。结构单元与实体单元相互作用通过结构节点的连接来实现,土与结构接触面采用弹性弹簧模拟^[21],弹簧刚度通过FLAC用户手册中推荐的经验公式(6)确定^[33],弹簧强度采用摩尔-库仑强度关系模拟,参数采用Clayton等^[34]建议的取值,其中: $k_n = k_s = 3.0 \times 10^9 \text{ kN/m}$ (80K20S工况); $k_n = k_s = 1.5 \times 10^9 \text{ kN/m}$ (30K70S工况);摩擦角均取 30° 。

表 3 不同黏粒含量粉土的 PM4Silt 模型参数

Table 3 PM4Silt model parameters of silt with different clay contents

输入参数	默认值	标定值	
		30S70K	80S20K
$s_{u,cs}/\sigma'_{vc}$ 为不排水剪切强度比	-	0.32	0.85
G_0 为剪切模量系数	-	358	768
h_{p0} 为体积收缩率	-	2.6	3.6
n_G 为剪切模量指数	0.75	0.74	1.54
h_0 为塑性模量系数	0.5	-	0.2
e_0 为初始孔隙比	0.9	1.12	0.83
λ 为 $e-\ln p'$ 平面压缩系数	0.06	-	-
φ'_{cv} 为临界状态摩擦角	32°	28°	53°
$n_{b,wet}$ 为边界面参数	0.8	1.0	1.0
$n_{b,dry}$ 为边界面参数	0.5	-	-
n_d 为剪胀面参数	0.3	-	-
A_{d0} 为剪胀参数	0.8	-	-
$r_{u,max}$ 为最大孔压比	$p_{min} = p_{cs}/8$	0.6	0.95
z_{max} 为组构项	$10 \leq 40(s_u/\sigma'_{vc}) \leq 20$	-	-
c_z 为组构增长参数	100	20	150
c_s 为应变积累速率系数	$0.5 \leq 1.2s_u/\sigma'_{vc} + 0.2 \leq 1.3$	0.3	1.3
c_{GD} 为模量衰减系数	3.0	-	-
c_{kat} 为塑性模量系数	4.0	-	-

注:次要参数空缺表示按照默认值标定

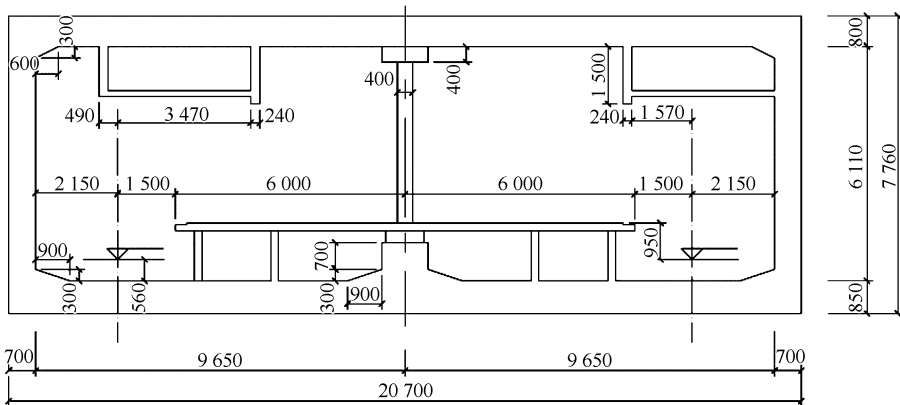


图 3 地铁车站截面尺寸示意图(单位:mm)

Fig.3 Schematic diagram of section size of subway station (Unit:mm)

$$k_n = k_s = 10 \cdot \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right] \quad (6)$$

式中: k_n 为法向弹簧刚度; k_s 为切向弹簧刚度; Δz_{min} 为接触面法向实体单元最小网格大小。

单元网格大小 Δl 可根据 Kuhlemeyer 等^[35] 建议的公式确定,即式(7)~(8)。取带宽范围内最大频率 25 Hz 进行计算,本文数值模型采用的最大网格为 0.8 m,满足要求。

$$\Delta l \leq \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8} \right) \lambda_{min} = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8} \right) \frac{C_s}{f_{max}} \quad (7)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

式中: λ_{min} 为地震动最大频率分量对应的剪切波波长; C_s 为剪切波波速; f_{max} 为地震动最大频率分量; ρ 为土体天然密度; G 为剪切模量系数。

临近双车站工况在单一车站工况的基础上考虑三种工况,分别为平行车站工况、重叠车站工况和斜叠车站工况。与单一车站工况位置相同的车站称既有车站,另一个车站称临近车站,车站间距 $S = 1.5L$ (对于三种工况, L 分别表示车站长度、宽度和对角线长度)。为保证液化土层计算稳定,基底靠近加速度输入位置增加一层非液化土,采用线弹性模型进行模拟,剪切模量在小应变模量的基础上折减 30%^[36]。渗透系数根据 Zhou 等^[37] 建议的取值范围取值,其中 80K20S 土层取为 1×10^{-7} m/s,

30S70K 土层取为 3×10^{-9} m/s。根据 Boulanger 等^[1]的建议,应用 PM4Silt 模型进行动力分析时,模型底部采用静态边界,模型两侧应用绑定边界,采用

PM4Silt 模型模拟的液化土层可采用瑞利阻尼,其中阻尼比为 0.5%,中心频率为 1 Hz。综上所述,数值模型的示意如图 4 所示。

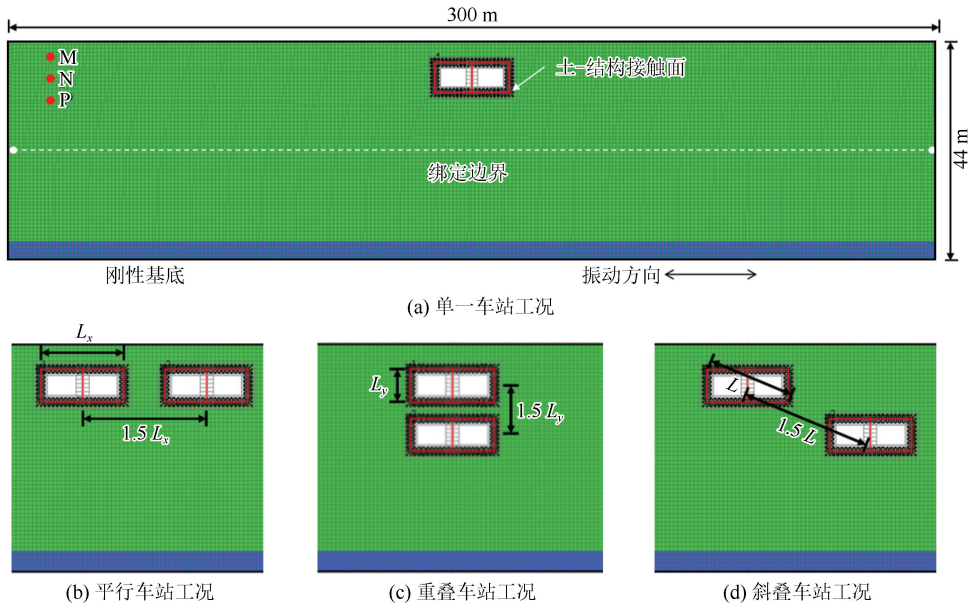


图 4 数值模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of numerical model

1.3 地震动选取

动力分析中选取阪神地震 Kobe 波进行分析。使用 SeismoSignal 软件^[38]进行基线修正与滤波,带宽范围取 0.1~25 Hz,地震动调幅至 0.3g,动持时为 30 s,得到的时程曲线如图 5 所示。

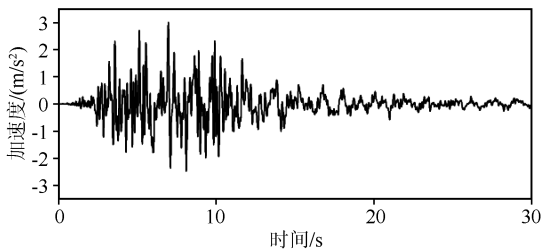


图 5 Kobe 波加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time history curve of Kobe wave

2 地震响应分析

2.1 可液化层典型动力响应

本节采用 80S20K 土层分析,介绍可液化层典型动力响应。选取远场埋深 3 m、8 m 和 13 m 观测点进行分析,三个观测点距边界 10 m。图 6 展示了远场三个观测点的加速度、位移和超静孔压比时程曲线。三个观测点加速度峰值相差不大,但位移峰值随埋深增大逐渐减小,说明浅埋地下结构侧向变形较大。超静孔压比方面,在地震动初期土体的超

静孔压比几乎不变,随地震动进行超静孔压比逐渐升高,最终趋于稳定。三个观测点的滞回曲线和应力路径曲线如图 7 所示。由图可知,随着埋深的增加,土体承受的剪应力逐渐增大,但液化程度降低。

2.2 土层黏粒含量对临近双车站影响分析

首先以单一车站工况为基础,介绍地铁车站结构典型动力响应。地震动作用下,由于地下土层发生液化后,地下结构将产生较大上浮位移。图 8 展示了地震结束时刻土体的竖向位移云图和位移矢量图。由图 8 可知,左右两侧土体下沉,上下两侧土体上升,上升浮力作用,地下车站存在上浮趋势,可液化土层中的土体将车站结构顶起产生上浮位移,车站结构正上方隆起明显,地表处最大上浮位移约 15 cm。三种不同分布形式工况下,地震结束时刻土体竖向位移云图和地震结束时刻周围土体位移矢量图如图 9 所示。从图中不难看出,双车站工况和单一车站工况周围土体流动趋势相同,区别在于,存在临近车站时,临近车站会对周围土体的流动产生一定的阻碍作用,继而导致结构上浮规律不同。

地震荷载作用下,结构观测点的内力时程曲线如图 10 所示。从图中可以看出,中柱顶底部内力时程曲线规律较为相似,绝对值大小几乎相同。地震荷载下车站结构周围土体产生液化大变形,和中柱

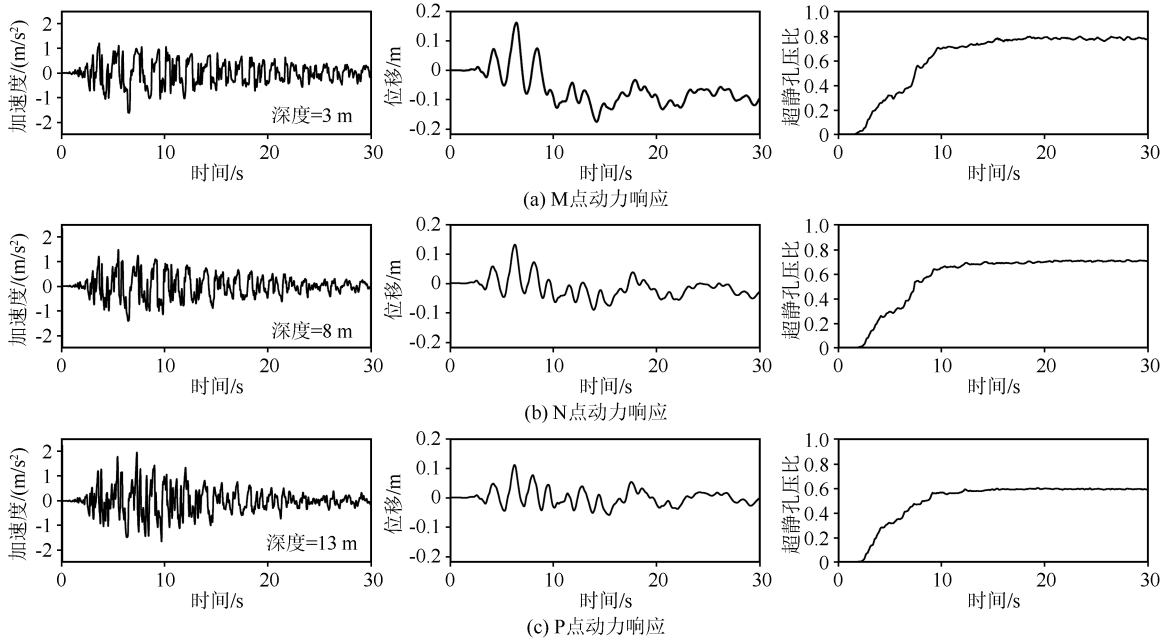


图 6 不同监测点加速度、位移和超静孔压比时程曲线

Fig.6 Time history curves of acceleration, displacement, and excess pore pressure ratio at different monitoring points

相比,侧墙在惯性力的基础上还受到两侧动土压力的作用,因此侧墙内力受埋深影响较大。由于侧墙底部的动土压力大于侧墙顶部,因此侧墙底部的内力较大。在后续分析中,可采用中柱顶端和侧墙底部作为动力响应重点关注截面。

基于上文确定的观测截面,对临近车站穿越不同黏粒含量粉土土层时的地震响应进行分析,车站穿越土层采用前文标定的两种粉土工况。观测点选在既有车站中柱顶部和侧墙底部,用以分析增加临近车站后的影响。定义 S_{37}/S_{82} 为响应比,其中 S_{37} 为 30S70K 土层动内力响应, S_{82} 为 80S20K 土层动内力响应,这一指标越小,表示动内力对黏粒含量越敏感。地震荷载作用下,不同黏粒含量粉土工况下既有车站结构内力峰值如表 4 所列。黏粒含量升高后,既有车站的内力峰值降低。两种土质中柱内力差异最为明显,在临近双车站设计时,尽量使其位于液化程度较低的土层,可以有效增大结构的安全储备,是一种比较经济的手段。

2.3 车站间距对临近双车站影响分析

存在临近车站时,周围土体流动会受到阻碍,车站间距会对车站结构动力响应产生影响。本节将从内力、层间位移角和上浮位移三个指标分析不同车站间距的影响,分析工况如表 5 所列。

地震荷载作用下,平行车站工况结构动力响应和归一化车站间距的关系曲线如图 11 所示。随着

车站间距增加,右侧车站结构对土体液化的削弱作用逐渐减弱,既有车站的内力逐渐增大,接近单一车站工况内力。当车站间距大于 3 倍结构宽度时,临近车站的有利作用几乎消失。正向层间位移角峰值随着车站间距增大呈现先增大后减小的趋势,负向反之。由于右侧存在临近车站,故负向层间位移角的影响更大一些。当车站间距在 1.8~5 倍结构宽度时,能有效发挥临近车站和周围土体协同作用。随右侧车站远离,车站间协同抵抗上浮的机制呈现先增强后迅速减弱的趋势,当车站间距大于 4 倍结构宽度时,既有车站的层间位移角及上浮位移和单一车站工况十分接近,两个车站的相互作用完全丧失。

综上所述,当车站间距大于 4 倍结构宽度时,既有车站的各项动力响应与单一车站十分接近,说明该车站影响范围为 4 倍结构宽度,在此范围内水平分布上的车站应考虑临近效应的影响。车站间距为 1.5~2 倍结构宽度时,既有车站的内力和上浮位移均较小,为水平分布双车站优先考虑的车站间距。

重叠车站工况观测点内力峰值和归一化车站间距的关系曲线如图 12 所示。由于刚度变化,下侧存在车站会使上侧车站内力略有减小。当增大车站间距时,中柱内力和侧墙弯矩变化不大。上部车站的内力依旧没有太大变化,这与输入的地震动为水平地震动有关。随着车站间距增大,车站协同

抵抗水平荷载的作用减弱,当间距达到3倍结构高度时,层间位移角与单一车站工况趋同。下侧车站的远离使车站间协同抵抗上浮的机制逐渐减弱,导

致上层车站上浮位移增大。当车站间距超过2.2倍结构高度时,上部车站结构上浮位移超过单一车站工况。

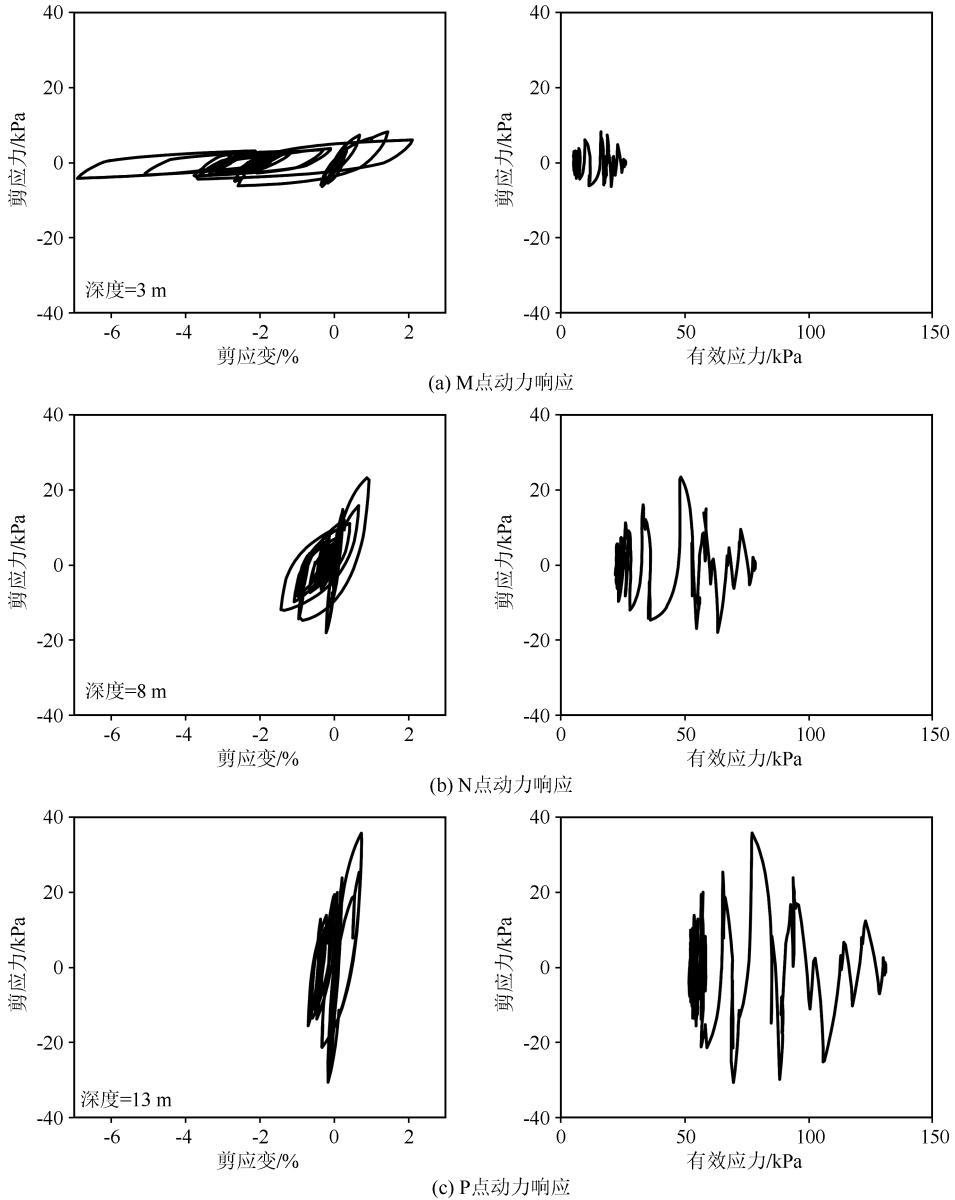


图7 不同观测点滞回曲线和应力路径曲线

Fig.7 Hysteretic curve and stress path curve at different monitoring points

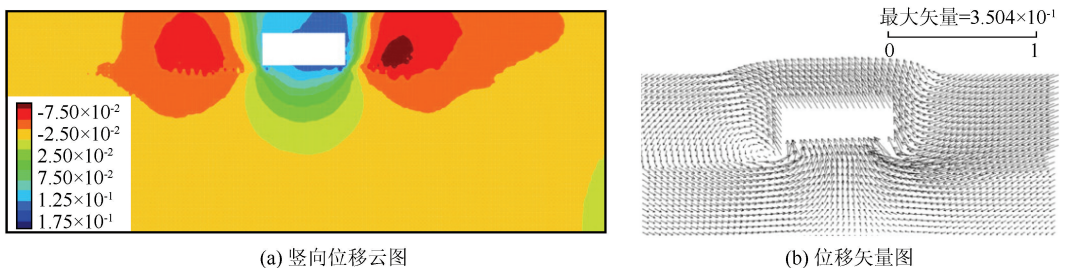


图8 单一车站地震动结束时刻土体竖向位移云图和位移矢量图(单位:m)

Fig.8 Cloud map and vector diagram of vertical displacement of soil at the end of earthquake for single station (Unit: m)

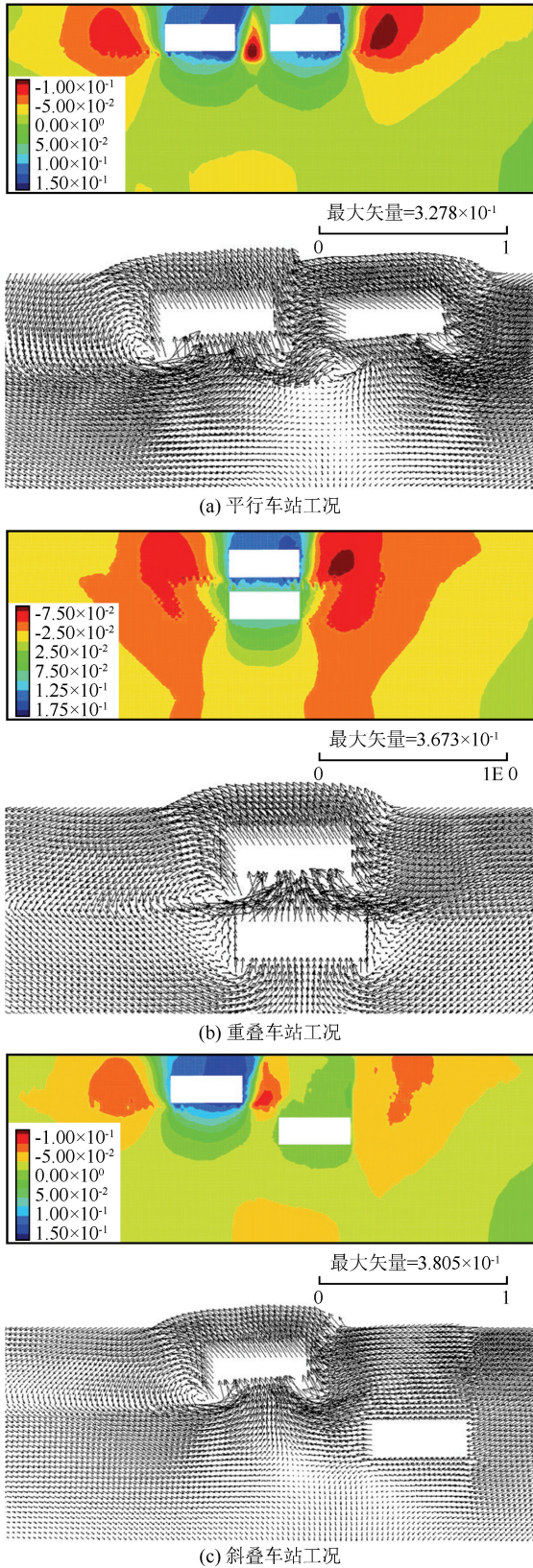


图 9 临近双车站地震动结束时刻土体竖向位移云图和位移矢量图(单位:m)

Fig.9 Cloud map and vector diagram of vertical displacement of soil at the end of earthquake for two adjacent stations (Unit: m)

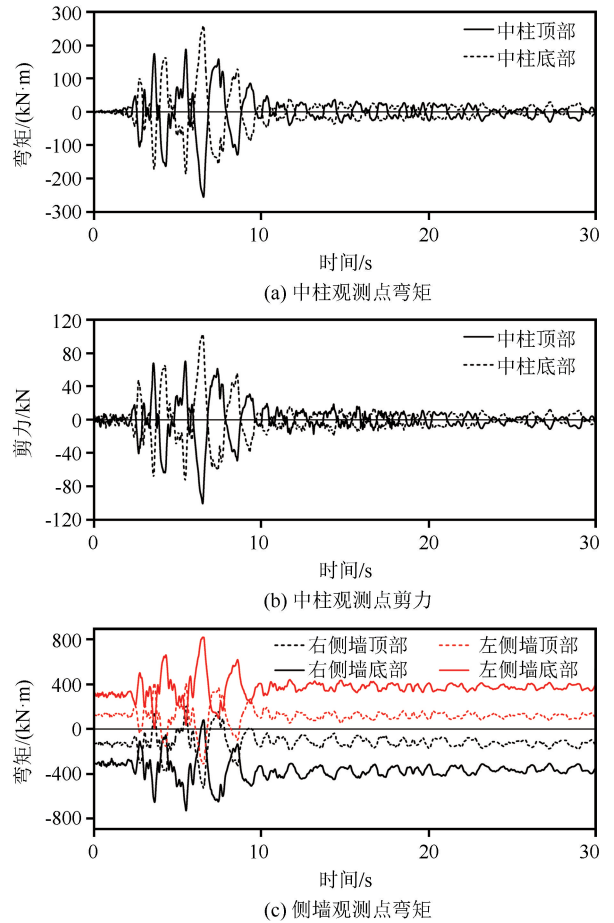


图 10 结构观测点内力时程曲线

Fig.10 Internal force time history curve of structural monitoring points

表 4 不同黏粒含量粉土层既有车站结构内力峰值
Table 4 Peak internal force of existing station structure in silt layer with different clay contents

	分布形式	80S20K	30S70K	S_{37}/S_{82}
中柱顶部 弯矩峰值 /(kN·m)	平行车站	-242.32	-156.38	0.65
	重叠车站	-243.79	-156.31	0.64
	斜叠车站	-249.57	-147.89	0.59
右墙底部 弯矩峰值 /(kN·m)	平行车站	98.16	57.90	0.59
	重叠车站	92.27	76.24	0.83
	斜叠车站	93.48	59.17	0.63
中柱顶部 剪力峰值 /kN	平行车站	724.98	650.96	0.90
	重叠车站	705.26	616.38	0.87
	斜叠车站	748.28	645.29	0.86
左墙底部 弯矩峰值 /(kN·m)	平行车站	-814.32	-645.59	0.79
	重叠车站	-784.98	-636.90	0.81
	斜叠车站	-831.29	-657.61	0.79

表 5 车站间距参数分析工况

Table 5 Analysis condition of station spacing parameters

	平行车站工况	重叠车站工况	斜叠车站工况
S/L	1.5,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0	1.5,2.0,2.5,3.0	1.5,2.0,2.5,3.0

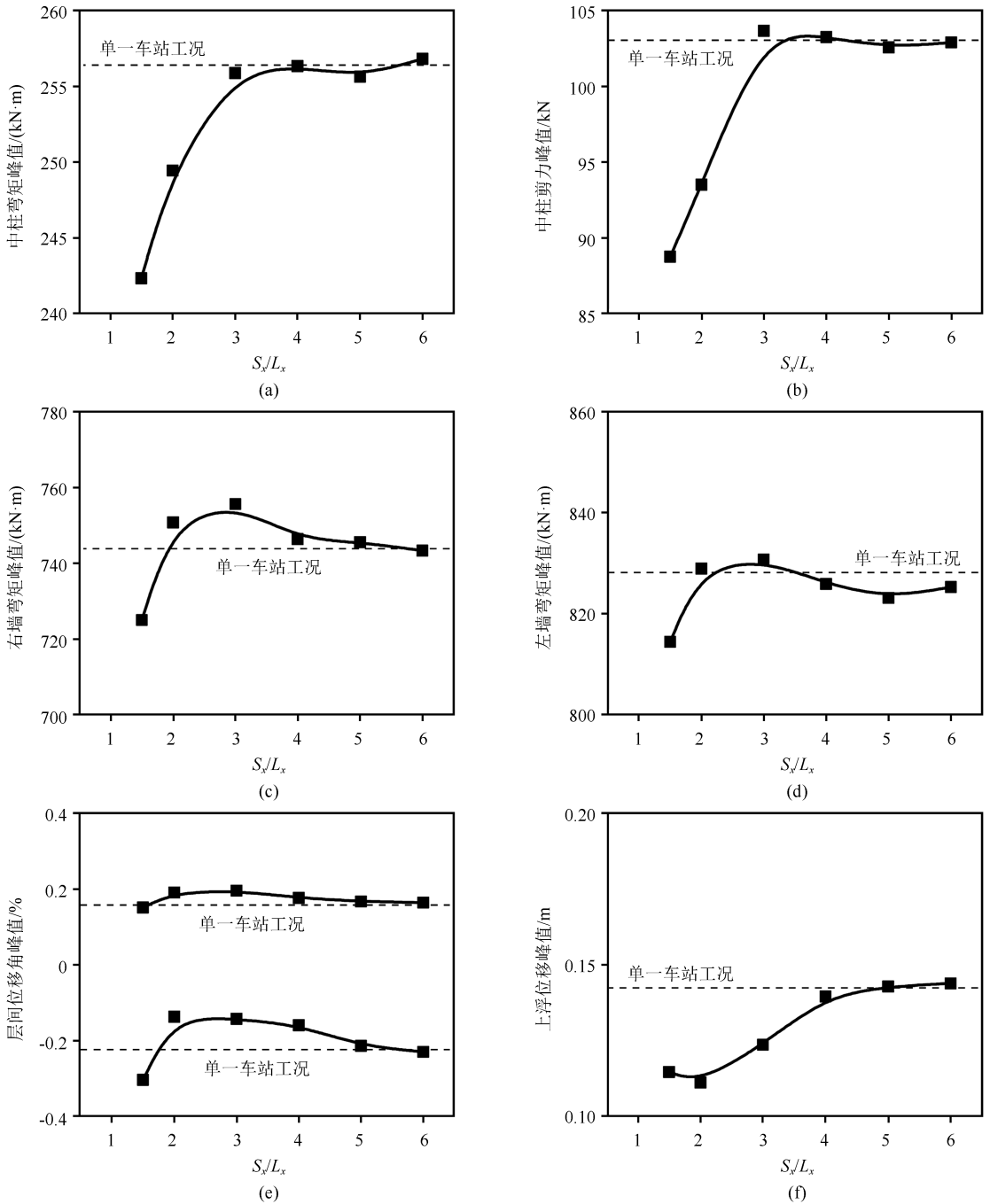


图 11 平行车站工况结构动力响应和归一化车站间距的关系

Fig.11 Relationship between structural dynamic response and normalized station spacing under parallel station condition

斜叠车站工况观测点内力峰值和归一化车站间距的关系曲线如图 13 所示。由于下侧车站存在车站对中柱内力响应影响不大,因此当车站间距增大时,斜叠车站工况和平行车站工况的中柱内力规律相似。对于侧墙而言,由于右下侧车站距右侧墙观测点更近,因此右侧墙弯矩对间距加大更加敏感。由于水平间距增大,车站间的协同作用增强;由于竖

向间距增大,加速度放大效应减弱。在二者共同影响下,右侧墙弯矩降低明显。和水平工况规律相同,正向层间位移角峰值先增大后减小,负向反之。当车站间距达到 3 倍结构对角线长度时,层间位移角与单一车站工况趋同。上浮位移方面,随车站间距变化不大。

综上所述,斜叠车站工况中,车站间距对右侧墙

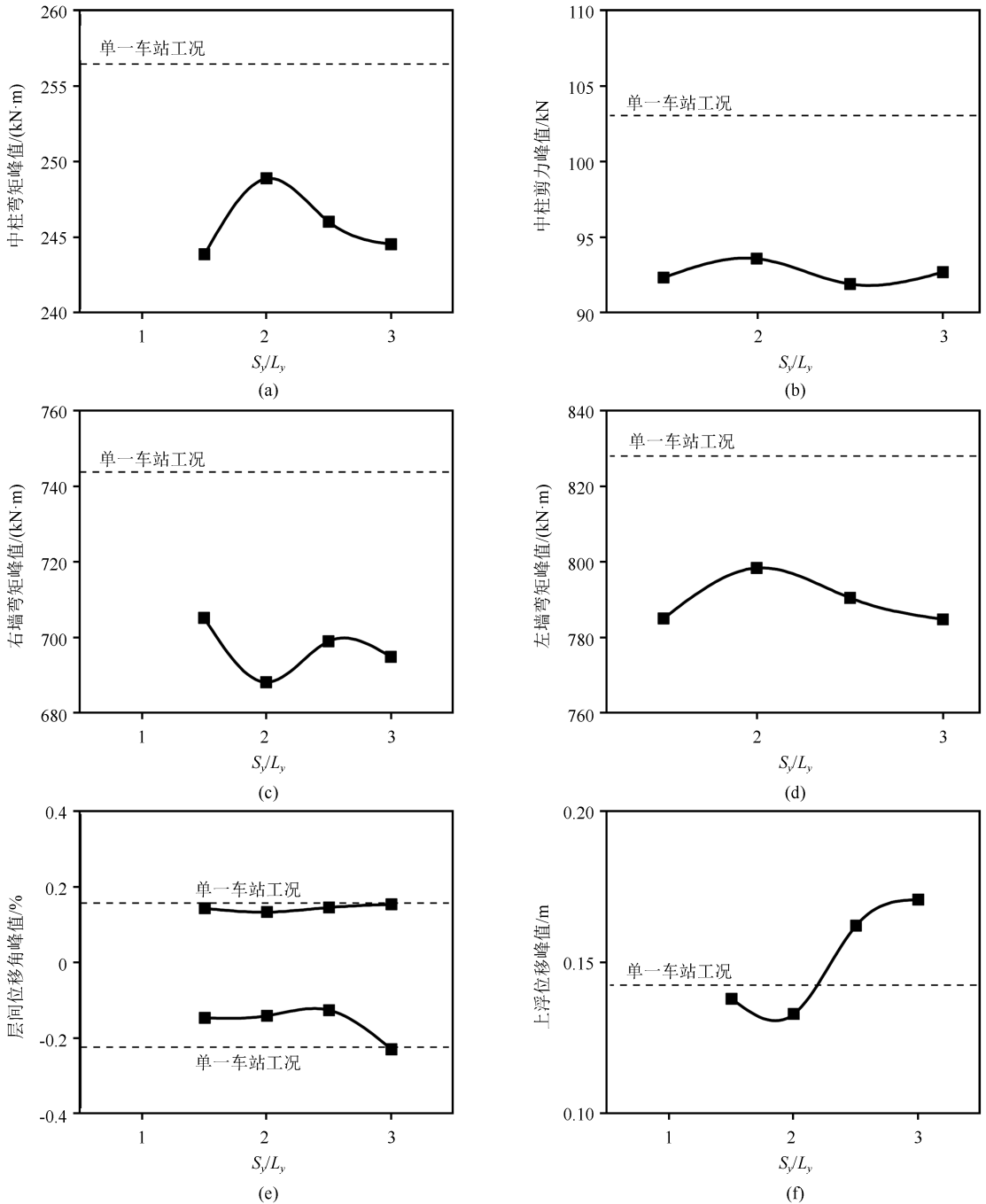


图 12 重叠车站工况结构动力响应和归一化车站间距的关系

Fig.12 Relationship between structural dynamic response and normalized station spacing under overlap station condition

弯矩影响显著,对上浮位移影响不大,车站间距为 2~2.5 倍结构对角线长度时对结构较为有利。

3 结语

本文通过三轴试验分析了不同黏粒含量粉土的静、动力力学性质,并依托FLAC8.0有限差分软件分析了地铁车站穿越可液化土层时的动力响应规律,

得出的主要结论如下:

(1) 不同黏粒含量粉土静动力特性差异明显。黏粒含量较低的黏质粉土和黏粒含量较高的粉质黏土相比动强度较大,但两种土样归一化后的模量衰减曲线相差不大。

(2) 可液化土层典型动力响应表明:随深度减小,土体的超静孔压比和剪应变峰值显著升高,浅层

土在强震作用时发生明显液化。低黏粒含量土层工况中,中柱顶部地表上浮位移约 15 cm。

(3) 土层黏粒含量升高后,既有车站的内力峰值降低,高黏粒含量对车站内力产生明显有利作

用,其中中柱内力对土层黏粒含量较为敏感。在临近双车站设计中,尽量使车站位于液化程度较低的高黏粒含量土层是增大结构安全储备较为经济的办法。

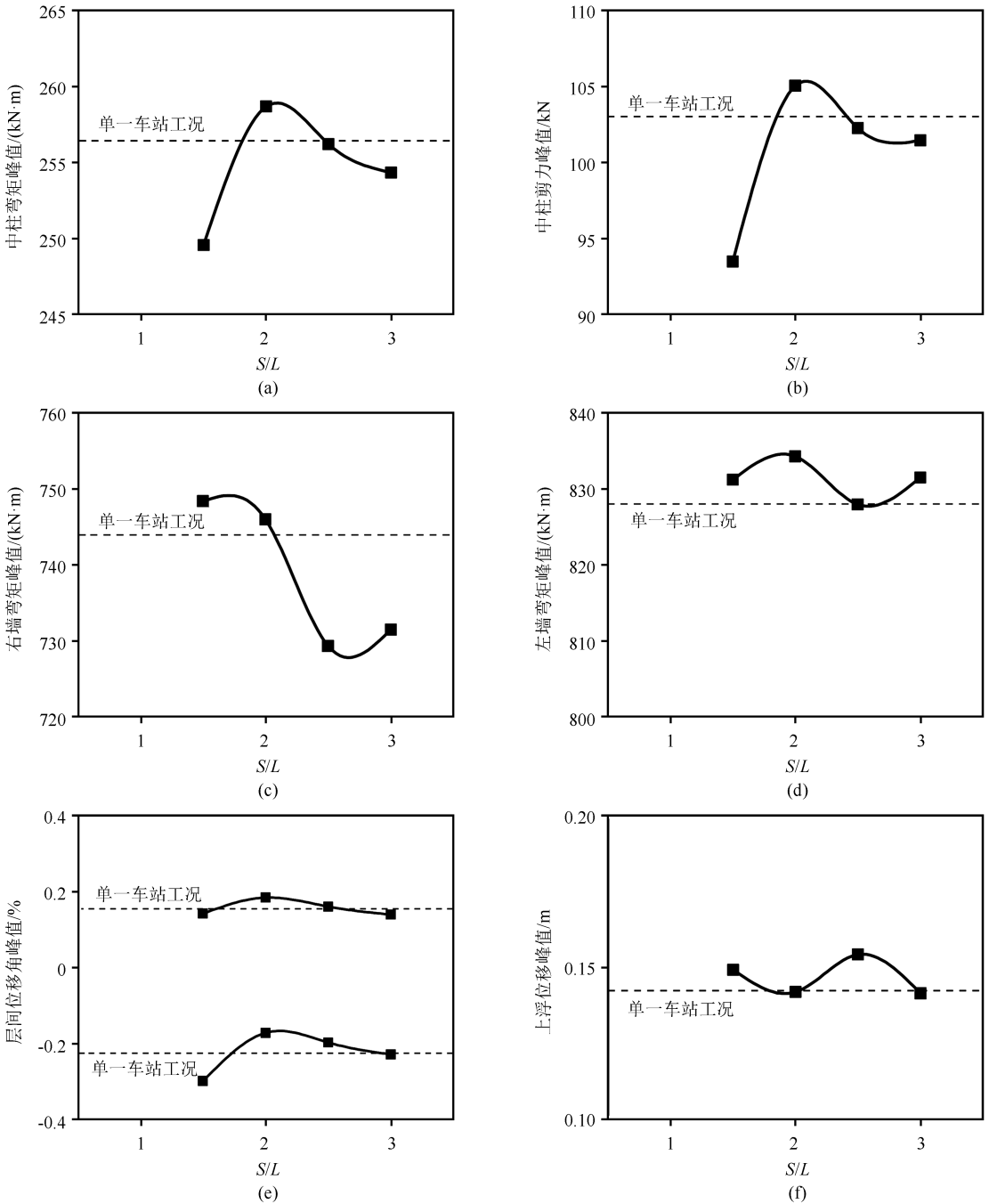


图 13 斜叠车站工况结构动力响应和归一化车站间距的关系

Fig.13 Relationship between structural dynamic response and normalized station spacing under offset station condition

(4) 平行车站相互作用与车站间距显著有关,随着两个车站间距增大,平行车站工况车站间的相互作用逐渐减小,既有车站影响范围约 4 倍的结构

宽度,在此范围外的车站结构在设计时可不考虑既有车站的影响。临近的双车站工况中存在能最大限度发挥相互作用优势的车站间距范围;平行车站工

况最优车站间距为 1.8~5 倍结构宽度;重叠车站工况为 1.5~2.2 倍结构高度;斜叠车站工况为 2~2.5 倍结构对角线长度。

参考文献(References)

- [1] BOULANGER R W, IDRIS I M. Evaluation of cyclic softening in silts and clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(6): 641-652.
- [2] ZHENG G, YANG X Y, ZHOU H Z, et al. A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 95: 119-128.
- [3] ZHOU H Z, XU H J, YANG P B, et al. Centrifuge and numerical modelling of the seismic response of tunnels in two-layered soils[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 113: 103980.
- [4] ZHENG G, ZHANG W B, ZHANG W G, et al. Neural network and support vector machine models for the prediction of the liquefaction-induced uplift displacement of tunnels[J]. *Underground Space*, 2021, 6(2): 126-133.
- [5] 汪闻韶. 土的液化机理[J]. *水利学报*, 1981, 12(5): 22-34.
WANG Wenshao. Mechanism of soil liquefaction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1981, 12(5): 22-34.
- [6] YANG S C, LESHCHINSKY B, CUI K, et al. Influence of failure mechanism on seismic bearing capacity factors for shallow foundations near slopes[J]. *Géotechnique*, 2021, 71(7): 594-607.
- [7] ZHOU H Z, ZHENG G, LIU J F, et al. Performance of embankments with rigid columns embedded in an inclined underlying stratum: centrifuge and numerical modelling[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(5): 1571-1584.
- [8] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(1): 89-107.
- [9] BRAY J D, SANCIO R B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(9): 1165-1177.
- [10] ZHOU H, ZHANG J, YU X, et al. Stochastic bearing capacity and failure mechanism of footings placed adjacent to slopes considering the anisotropic spatial variability of the clay undrained strength[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24(4): 04024022.
- [11] 曹炳政, 罗奇峰, 马硕, 等. 神户大开地铁车站的地震反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(4): 102-107.
CAO Bingzheng, LUO Qifeng, MA Shuo, et al. Seismic response analysis of Dakai subway station in Hyogoken—Nanbu earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(4): 102-107.
- [12] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲, 等. 土-结构动力相互作用系统离心机振动台模型试验[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(11): 114-121.
LIU Jingbo, LIU Xiangqing, WANG Zonggang, et al. Dynamic centrifuge model test of a soil-structure interaction system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(11): 114-121.
- [13] 凌道盛, 郭恒, 蔡武军, 等. 地铁车站地震破坏离心机振动台模型试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(12): 2201-2209.
LING Daosheng, GUO Heng, CAI Wujun, et al. Research on seismic damage of metro station with centrifuge shaking table model test[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(12): 2201-2209.
- [14] 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): 624-630.
ZHAO Yuan, DU Xiuli, LI Liyun. The effect of obliquely incident seismic waves on dynamic response of underground structures[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(6): 624-630.
- [15] LEE T H, PARK D, NGUYEN D D, et al. Damage analysis of cut-and-cover tunnel structures under seismic loading[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(2): 413-431.
- [16] 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 and the Environment*, 2016, 75(3): 1169-1182.
- [17] ZHOU H Z, LIU X N, TAN J L, et al. Seismic fragility evaluation of embankments on liquefiable soils and remedial countermeasures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 164: 107631.
- [18] ZHOU H Z, XU H J, YU X X, et al. Evaluation of the bending failure of columns under an embankment loading[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(7): 04021112
- [19] YANG S C, LESHCHINSKY B, CUI K, et al. Unified approach toward evaluating bearing capacity of shallow foundations near slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(12): 04019110.
- [20] ZHENG G, YANG P B, ZHOU H Z, et al. Evaluation of the earthquake induced uplift displacement of tunnels using multivariate adaptive regression splines [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 113: 103099.
- [21] ZHANG T Q, NEIL TAYLOR R, ZHENG G, et al. Modelling ground movements near a pressurised tunnel heading in drained granular soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 104: 152-166.
- [22] ZHENG G, SUN J B, ZHANG T Q, et al. Mechanism and countermeasures of progressive failure in shield tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104797.
- [23] 姜忻良, 谭丁, 姜南. 交叉隧道地震反应三维有限元和无限元分析[J]. *天津大学学报*, 2004, 37(4): 307-311.
JIANG Xinliang, TAN Ding, JIANG Nan. 3D finite and infinite element analysis for seismic response of intersecting tunnel[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2004, 37(4): 307-311.

- [24] PARVANOV S L, DINEVA P S, MANOLIS G D, et al. Seismic response of lined tunnels in the half-plane with surface topography [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, 12(2): 981-1005.
- [25] ZHENG G, YANG P B, ZHOU H Z, et al. Numerical modeling of the seismically induced uplift behavior of twin tunnels [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(1): 04020240.
- [26] 陶连金, 王文沛, 张波, 等. 竖向强震作用下密贴地铁地下交叉结构动力响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(3): 433-437. TAO Lianjin, WANG Wenpei, ZHANG Bo, et al. Dynamic response of closely-attached intersecting underground subway structures under vertical strong ground motion [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(3): 433-437.
- [27] 李积栋, 陶连金, 安军海, 等. 大型密贴交叉组合地铁车站地震响应分析[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(3): 361-367, 373. LI Jidong, TAO Lianjin, AN Junhai, et al. Seismic response analysis of large closely-attached intersecting combination of subway station [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(3): 361-367, 373.
- [28] LI Y T, DI H G, ZHOU S H, et al. Seismic analysis for cross transfer subway stations in soft soil stratum [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(5): 1732-1745.
- [29] PRICE A B. Cyclic strength and cone penetration resistance for mixtures of silica silt and kaolin [D]. California: University of California, Davis, 2018.
- [30] ZHENG G, GUO Z Y, ZHOU H Z, et al. Multibench-retained excavations with inclined-vertical framed retaining walls in soft soils: observations and numerical investigation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, 150(5): 05024003.
- [31] BOULANGER R W, ZIOTOPOULOU K. PM4Silt (Version 1): a silt plasticity model for earthquake engineering applications [R]. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 2018: 108.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2010.
- [33] MONTGOMERY J, ZIOTOPOULOU K. Numerical simulations of selected LEAP centrifuge experiments with PM4Sand in FLAC [C] // Model Tests and Numerical Simulations of Liquefaction and Lateral Spreading: LEAP-UCD-2017. Berlin: Springer International Publishing, 2020: 481-497.
- [34] CLAYTON C R I, WOODS R I, WOODS R I, et al. Earth pressure and earth-retaining structures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [35] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(5): 421-427.
- [36] PRETELL R, ZIOTOPOULOU K, DAVIS C A. Liquefaction and cyclic softening at balboa boulevard during the 1994 Northridge earthquake [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(2): 05020014.
- [37] ZHOU H Z, XU H J, YANG P B, et al. Centrifuge and numerical modelling of the seismic response of tunnels in two-layered soils [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 113: 103980.
- [38] ZHU T, WANG R, ZHANG J M. Effect of nearby ground structures on the seismic response of underground structures in saturated sand [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 146: 106756.

(本文编辑:任 栋)