



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407035

引用格式:李文博,刘巧凤,郭飞,等.微倾斜可液化场地中装配式地铁车站结构地震响应[J].科学技术与工程,2025,25(19):8218-8225.

Li Wenbo, Liu Qiaofeng, Guo Fei, et al. Seismic response of prefabricated subway station structures in slightly inclined liquefiable sites[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 8218-8225.

微倾斜可液化场地中装配式地铁车站 结构地震响应

李文博¹, 刘巧凤², 郭飞³, 安军海^{2*}, 张彦华²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100371; 2. 河北科技大学建筑工程学院, 石家庄 050018;
3. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100045)

摘要 为了研究装配式地铁车站结构在倾斜可液化场地中的适用性,基于长春双丰站的工程实际,采用有限差分软件FLAC3D开展了可液化地层中装配式地铁车站结构的地震响应分析,分析了地基孔隙水压力、液化土体侧移、地铁车站结构的动力反应与上浮特征及装配式地铁车站结构的变形特点等。结果表明,倾斜可液化场地条件下装配式地铁车站两侧孔隙水压力呈现出靠近车站结构位置出现明显的负孔压现象,且结构左侧(上坡向)土体的负孔压明显大于右侧(下坡向);地基土体距离车站结构越远,液化现象越明显;装配式地铁车站结构对周围土体侧移流滑有明显的抑制作用;上坡向侧墙(构件C1)主应力大于下坡向侧墙(构件C2),且结构上坡向侧墙底部主应力最大,因此在抗震设计时应重点注意结构上坡向侧墙。

关键词 装配式地铁车站; 液化; 数值模拟; 微倾斜场地; 地震响应

中图分类号 TU93 P315; **文献标志码** A

Seismic Response of Prefabricated Subway Station Structures in Slightly Inclined Liquefiable Sites

LI Wen-bo¹, LIU Qiao-feng², GUO Fei³, AN Jun-hai^{2*}, ZHANG Yan-hua²

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co. Ltd., Beijing 100371, China;
2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
3. Beijing Municipal Construction Co., Ltd., Beijing 100045, China)

[Abstract] The applicability of prefabricated subway station structures in inclined liquefiable sites was investigated. Based on the actual project of Shuangfeng subway station in Changchun City, the finite difference software FLAC3D was used to carry out the seismic response analysis of prefabricated subway station structures in liquefiable soil, for example, the pore water pressure of the foundation, the lateral motion of the liquefied soil, the dynamic response and uplift characteristics of the subway station structure, and the deformation characteristics of the prefabricated subway station structures were analyzed. The results show that the negative pore pressure phenomenon of pore water pressure on both sides of prefabricated subway station under inclined liquefiable site conditions is present, and the phenomenon becomes more obvious the closer the location of the station structure is to the station, and at the same time, the negative pore pressure of the soil on the left side of the structure (uphill) is significantly greater than that on the right side (downhill). The further away the foundation soil is from the station structure, the more pronounced the liquefaction is. The phenomenon of lateral slip-page of the surrounding soil is significantly suppressed by prefabricated subway station structures. The principal stresses in the upslope sidewall (member C1) are greater than those in the downslope sidewall (member C2), and the principal stresses at the bottom of the upslope sidewall of the structure are greatest, so the upslope sidewall of the structure should be given priority in the seismic design.

[Keywords] prefabricated subway station; liquefaction; numerical simulation; slight inclined ground; seismic response

随着中国城市轨道交通的快速发展,装配式地铁车站结构逐渐成为地下结构的建造的主导结构形式,在中国长春、深圳、青岛等地区在地下结构建

设中采用了全装配式地铁车站结构。装配式建造技术大大加快了地下结构的建设速度,提高了工程质量,降低了建设过程中对环境的污染,同时,消除

收稿日期: 2024-09-20 修订日期: 2025-12-20

基金项目: 河北省自然科学基金(E2024208050); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023079)

第一作者: 李文博(1985—), 男, 汉族, 内蒙古赤峰人, 博士, 高级工程师。研究方向: 岩土工程。E-mail: li1883216@126.com。

* 通信作者: 安军海(1987—), 男, 汉族, 河北邯郸人, 博士, 副教授。研究方向: 地下结构抗震。E-mail: tsanjunhai@126.com。

了冬季施工隐患,有效的保证了冬季施工质量。然而,与现浇地铁车站结构相比,装配式地铁车站结构由多个预制构件拼装而成,在地震作用下,二者的抗震性能必然存在差异^[1]。因此,有必要对装配式地铁车站结构的抗震性能进行进一步研究。

近年来,国内外相关学者对装配式地铁车站结构的抗震性能开展了系列研究。Tao 等^[2]基于振动台试验研究了围护结构对装配式地铁车站结构抗震性能的影响,发现围护结构有效提高装配式结构的抗变形强度和节点刚度。Liu 等^[3]、杜修力等^[4]开展了地震作用下预制装配式车站构件拼接节点不同连接方式的破坏形态和力学性能试验,发现灌浆套筒区域有明显的刚域效应,试件破坏后裂缝主要分布在套筒上下两端一定范围内。Ding 等^[5]、陶连金等^[6]采用有限元软件 Abaqus 分析了某预制装配式地铁车站结构在不同场地类别条件下的抗震性能,并对比了结构分别在不同地震波入射角度下的地震响应,研究结果表明,设防地震作用下,预制装配式地铁车站结构比现浇结构具有更好的抗震性能。江志伟等^[7]基于数值模拟的方法研究了全装配式和同型现浇车站结构在不同地震强度下的变形、内力和损伤等反应的区别。

以上研究成果从不同角度揭示了装配式车站结构的地震变形模式及破坏机理,但其均是将装配式地下车站结构置于一般地层中,并未考虑可液化地层的影响。地基液化是导致地下结构在地震中发生严重震害的重要威胁之一^[8]。在中国城市国道交通的大规模建设中,很多地区的地铁建设穿越可液化地层。

对于倾斜可液化地基中地铁车站结构的抗震性能学者们也进行了大量研究。陈继华等^[9]基于振动台试验研究了液化土层表面不同倾角场地的变形特性,研究发现地表倾角较大时,会加大液化地基表面的震陷现象。王瑞等^[10]基于数值分析的方法研究了两层三跨地铁车站结构在不同倾斜度的可液化场地中的地震响应。庄海洋等^[11]基于振动台试验研究了地表倾角为 6° 时可液化场地中地铁车站结构与隧道连接部位的地震响应,研究发现,两种结构发生了明显的不均匀上浮现象,可能会加重地震作用下连接部位的破坏。邱宇等^[12]基于有限差分软件 FLAC3D 分析了缓倾斜可液化场地中两层两跨地铁车站结构地震响应规律。

以上研究成果从各自的角度研究了倾斜可液化场地以及地下结构的地震响应规律及破坏机理,但其研究对象都是针对现浇结构进行的,并未考虑装配式地铁车站结构在倾斜可液化场地中的影响。而已有震害及研究成果表明,地震液化引起的土体大变形才

是地下结构发生破坏的最主要外部因素^[13]。目前,对倾斜可液化地层中装配式地铁车站结构地震响应特性及破坏机理的研究仍尚未见刊,这为其不同地层条件下的进一步推广应用带来巨大挑战。

基于此,现依托长春双丰站(榫槽连接式的装配式地铁车站结构)工程实际,考虑将其置于不同倾角的可液化地层中,基于有限差分软件 FLAC3D 建立土-装配式地铁车站结构动力相互作用数值分析模型,通过分析全预制装配式地铁车站结构及模型土体的动力特性,深入揭示倾斜可液化场地中装配式车站结构的地震反应规律,以期为其进一步工程应用提供有价值的参考。

1 工程概况

长春装配式地铁车站结构为地下两层结构,采用“桩+锚”体系明挖法施工,车站结构宽 20.5 m、高 17.45 m。车站结构纵向一环一环拼接而成,每环宽度为 2 m,每 3 环设置一根中柱,每环由七块预制构件现场拼装连接,构件之间接头采用榫槽式连接,连接缝隙注入环氧树脂进行密封,除外轮廓外其他部位后浇而成,详细构造尺寸见参考文献[14-15]。图 1 所示为该车站结构断面示意图^[16]。

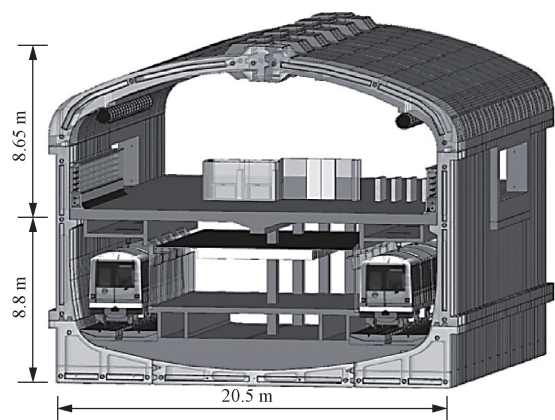


图 1 装配式地铁车站断面示意图^[16]

Fig. 1 Schematic section of assembled subway station^[16]

2 土-结构相互作用体系数值模型

2.1 数值模型

依据长春地铁双丰站结构开展数值模拟分析,采用有限差分软件 FLAC3D 建立土-地下结构相互作用数值分析模型,模型尺寸设置为 $160\text{ m} \times 52.5\text{ m} \times 20\text{ m}$ (图 2),地铁车站结构中部位埋深为 3 m,其中结构所在的土层为可液化土层,动力计算中模型四周边界采用自由场边界条件,模型底部采用固定约束。模型土体部分最大网格尺寸为 1 m,地铁车站结构模型网格进行了加密处理,最小网

格尺寸为 0.2 m, 以保证计算结果的精度。

地铁站结构断面长为 20.5 m, 宽为 17.45 m, 结构外轮廓由 5 类 7 个预制构件构成, 5 类构件编号为 A、B(1-2)、C(1-2)、D、E, 各装配节点采用榫卯连接, 中板、中柱拼装结束后采用混凝土现浇, 中板厚度为 400 mm, 中柱截面尺寸为 500 mm × 500 mm, 如图 3 所示。

图 4 为土层分布简图及监测点布置图, 设置地表倾斜角度分别为 0°、2°、4°、6° 四种工况。

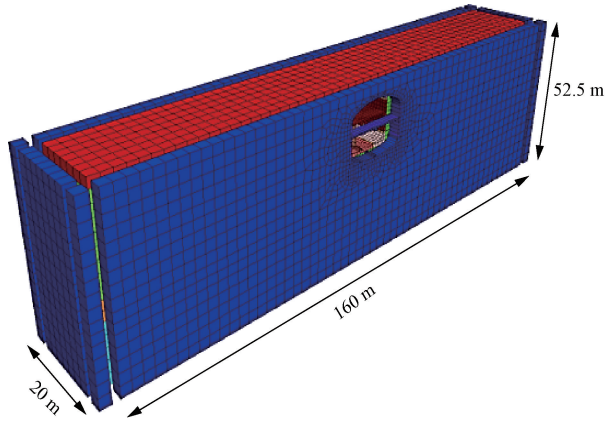


图 2 土-地下结构动力相互作用模型
Fig. 2 Soil-substructure dynamic interaction model

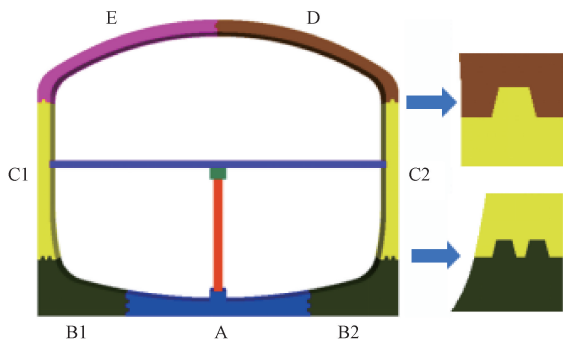
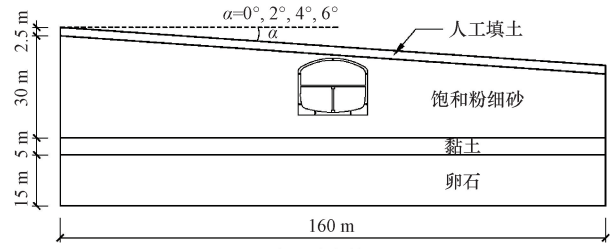
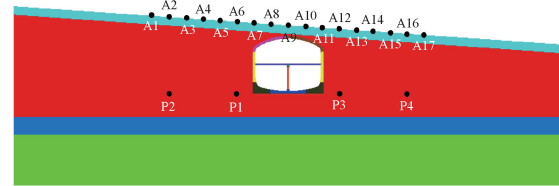


图 3 装配式地铁站结构模型
Fig. 3 Structural model of assembled subway station

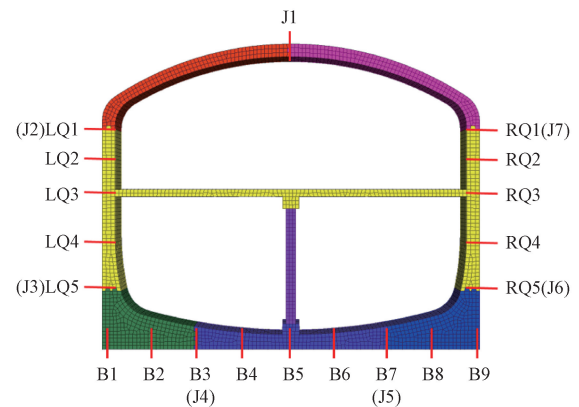


(a) 土层分布简图



P 为孔隙水压力监测点; A 为加速度监测点

(b) 土层中监测点布置图



LQ 为左侧墙; RQ 为右侧墙; B 为底板; J 为节点

(c) 结构中监测点布置图

图 4 土层分布及监测点布置

Fig. 4 Layout of monitoring points

2.2 场地条件及参数选择

计算模型中, 饱和粉细砂土层本构采用 FLAC3D 中的 PL-Finn 模型, 其他土层本构选用 Mohr-Coulomb 本构模型, 土层分布及其物理力学参数见表 1, 地铁站结构选用各向同性弹性模型, 结构物理力学参数见表 2。

表 1 场地土层物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of soil layers at the site

材料名称	厚度/m	体积模量/kPa	剪切模量/GPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	液化参数
人工填土	2.5	3×10^7	1×10^7	0.35	25	5	1 900	—
饱和粉细砂	30	2×10^7	7×10^6	0.30	35	0	1 800	Finn, $C_1 = 0.80$, $C_2 = 0.79$, $C_3 = 0.45$, $C_4 = 0.73$
黏土	5	2.65×10^7	1.52×10^7	0.28	10.5	25	2 000	—
卵石	15	3×10^8	2×10^8	0.22	35	0	2 100	—

注: Finn 模型是由 Martin 等^[17] 根据试验提出的用来解决土在循环荷载作用下体积应变及孔隙水压力的变化规律问题。通过回归试验数据, 得出了常量 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的最佳取值分别为 0.80、0.79、0.45、0.73。

2.3 接触面设置

装配式构件之间的连接处建立接触面,接触面设置采用 FLAC3D 软件中的导来导去法,来模拟装配式地铁车站结构拼装节点。装配节点接触面单元参数见表 3,装配式地铁车站结构节点位置接触面设置如图 5 所示。

表 3 装配节点接触面单元参数
Table 3 Parameters of the contact surface unit of the assembly node

类型	法向刚度/ (Pa·m ⁻¹)	切向刚度/ (Pa·m ⁻¹)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
接触	3 × 10 ¹⁰	3 × 10 ⁹	10	15

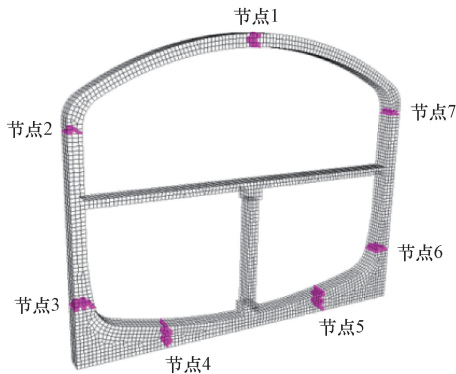


图 5 接触面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of contact surface

2.4 输入地震动

车站结构动力响应受输入地震动的峰值加速度及频谱特性影响明显^[18],地震波选用不同频谱特性的长春人工波、Kobe 波和 EL-Centro 波,将地震波峰值加速度分别调整为 0.15g、0.25g、0.4g(g 为重力加速度)从基岩底部作为水平向地震动输入,持时为 30 s。加速度时程曲线及傅里叶谱如图 6、图 7 所示。动力计算前,首先获取土-结构相互作用数值模型在重力荷载下的应力状态;并将其最终状态作为动力计算的初始状态平衡地应力,之后输入地震动开展时程分析。

表 2 混凝土物理力学参数

构件名称	弹性模量 E /GPa	密度 ρ /(kg·m ⁻³)	泊松比 μ
装配式构件 A~E (C50)	34.5	2 500	0.20
中柱、中板(C45)	33.5	2 500	0.18

3 地层地震响应分析

3.1 孔隙水压力分析

如图 8 所示为输入地震动峰值加速度为 0.25g 时不同地表倾角下装配式地铁车站结构底板两侧

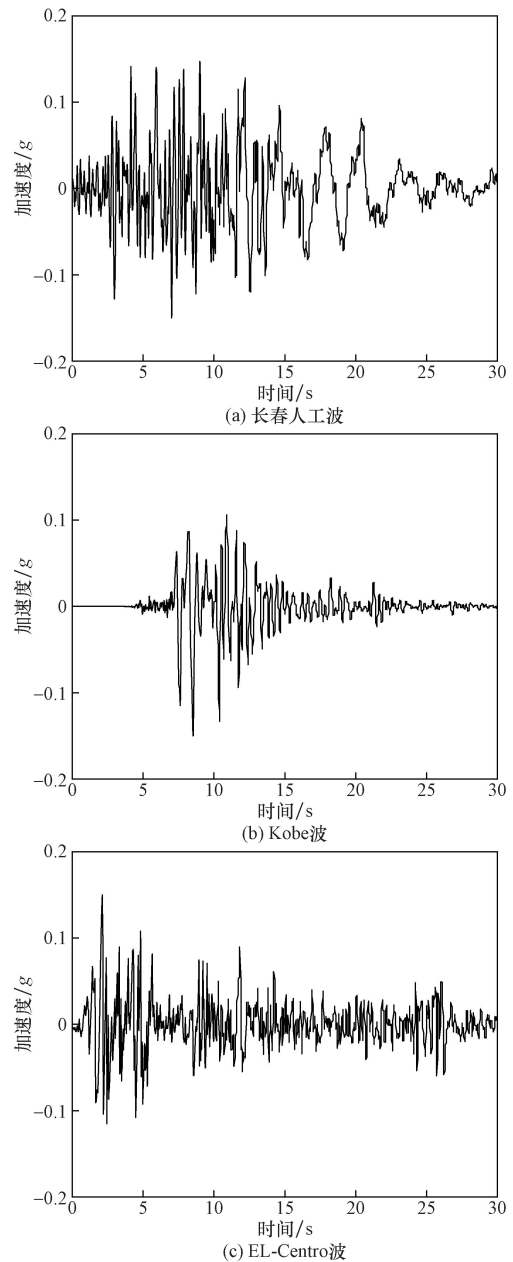


图 6 输入地震波加速度时程曲线

Fig. 6 Input seismic wave acceleration time course curve

不同位置超孔隙比时程曲线(P1 和 P2 分别为结构底板左侧 5 m 和 25 m 处土体监测点,P3 和 P4 分别为结构底板右侧 5 m 和 25 m 处土体监测点)。从图 8 中可以看出,靠近结构两侧的土体出现了明显的负孔压现象,结构左侧(上坡向)负孔压明显大于右侧(下坡向),且地表倾角越大负孔压现象越明显。这可能是由于在地震作用下结构上浮导致周围形成排水通道,在动土压力作用下,致使结构两侧产生明显负孔压现象,地表坡度越大结构左侧动土压力越大,结构两侧负孔压也越大。距离车站结构越远,土体超孔隙比越大,液化现象越明显,说明在倾斜可液化场地中地下结构的存在依然有抑制周

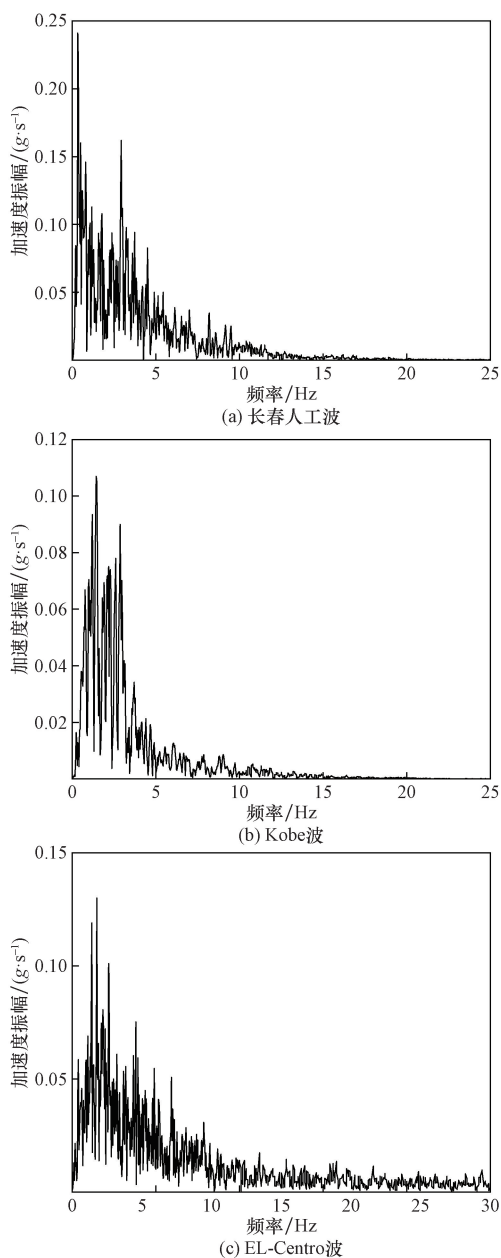


图7 输入地震波傅里叶谱

Fig.7 Input seismic wave Fourier spectrum

围土体液化的作用。距离车站结构两侧 25 m 处,地表倾角越大土体超孔压比越小,当地表倾角为 2°和 4°时,土体上坡向和下坡向均发生液化现象,下坡向液化现象更明显;当地表倾角为 6°时,上坡向一侧未液化,下坡向一侧发生了液化现象,这可能是由于上覆土体厚度不同造成的。

3.2 地表峰值加速度分析

图 9 所示为输入地震动峰值加速度为 0.25g 时地表不同位置处峰值加速度曲线(横坐标 0 ~ 20 m 处为地铁车站结构所在区域,每隔 5 m 取一个监测点)。从图 9 中可以看出,不同地表倾角工况下结构正上方地表峰值加速度都要小于结构侧方,这说

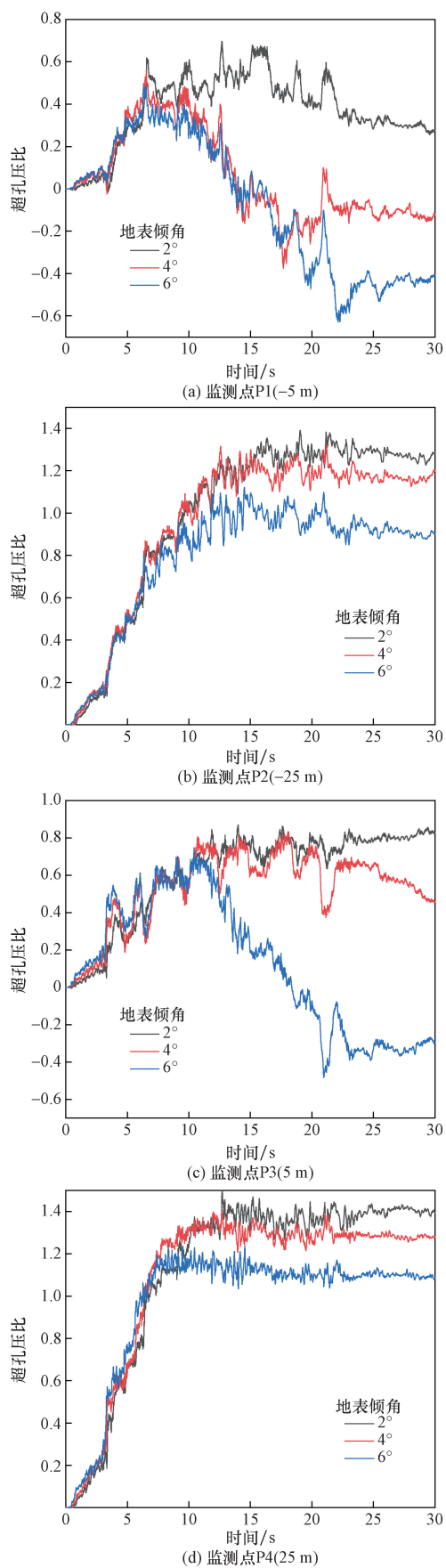


图8 土体超孔压比时程曲线

Fig.8 Time course curve of soil superporous pressure ratio

明地下结构具有一定的隔震作用。当地表倾角水平时,地表峰值加速度曲线几乎呈对称分布;当地表倾斜时,地表倾角越大,地表峰值加速度越大,且下坡向一侧的地表峰值加速度要明显大于上坡向一侧;这可能由于地表倾斜,地基发生向下坡向的滑移造成的。当地表倾角分别为 0° 、 2° 、 4° 、 6° 时,装配式地铁车站结构对地表峰值加速度的影响范围分别为地铁车站结构宽度的1.5、2.5、2.2倍;这说明当地表倾角为 2° 时,装配式地铁车站结构对地表加速度反应的隔震影响范围更大。

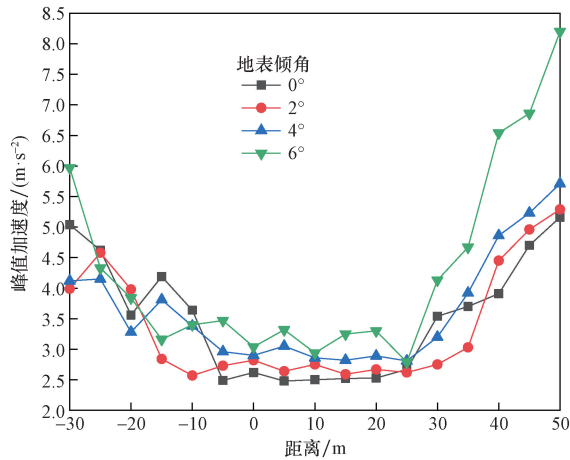


图9 地表峰值加速度曲线
Fig.9 Peak surface acceleration curve

3.3 液化土体侧向变形分析

图10所示为输入地震动为 $0.25g$ 时自由场和装配式结构周围地基可液化土体的最大侧向相对位移曲线。从图10中可以看出,地表倾角越大,各工况下土体侧向位移越大;在自由场工况中,不同地表倾角下土体最大侧移都发生在液化土层的顶部,而非自由场工况中,当地表倾角较小(2°)时,多个位置侧向位移最大值出现在液化土层不同埋深处;随着地表倾角的增加,土体侧向位移的最大值几乎都出现在液化土层的顶部。

与自由场工况相比,装配式对地基液化土体侧向位移有抑制作用,其影响范围主要在结构底板埋深以上的区域,且距离车站结构越近,抑制作用越明显;不同位置处液化土体侧向位移随埋深的减小呈现出增加的趋势,甚至因土体流滑造成土体侧向位移的突增。但是,埋深在地铁车站结构底板以上的土体侧移呈现出稳定增长的趋势,侧向位移突增现象主要表现在地铁车站结构底板埋深以下区域。

4 地铁车站结构地震响应分析

4.1 地铁车站结构侧墙(构件C1)应力分析

为了分析地震动作用下倾斜可液化场地对装配

式地铁车站结构应力反应的影响,表4所示为输入地震动峰值加速度为 $0.25g$ 时装配式地铁车站结构左右侧墙(构件C1、C2)主应力反应幅值。表中LQ1~LQ5为上坡向侧墙上的监测点,RQ1~RQ5为下坡向侧墙上的监测点。整体上看,装配式地铁

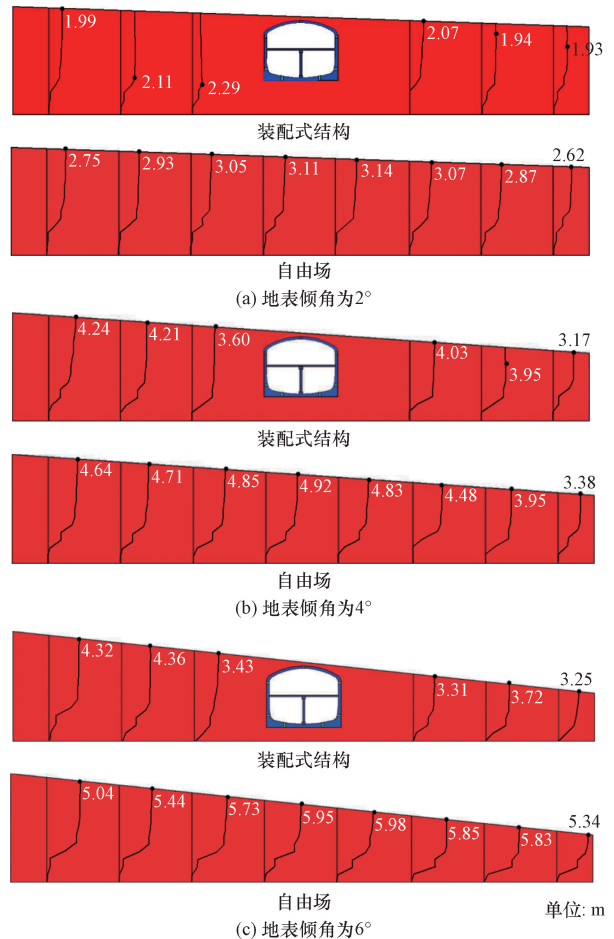


图10 土层最大侧向相对位移曲线
Fig.10 Maximum lateral relative displacement curve of soil layer

表4 地铁车站结构侧墙(构件C1、C2)主应力反应幅值
Table 4 Amplitude of principal stress response of structural side walls (members C1 and C2) of assembled subway stations

监测点	主应力反应幅值/MPa					
	2°		4°		6°	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
LQ1	0.40	-2.61	0.35	-2.71	0.28	-2.91
LQ2	0.23	-2.52	0.23	-2.62	0.63	-2.93
LQ3	1.07	-2.56	1.45	-2.69	1.61	-2.83
LQ4	0.70	-3.14	0.76	-3.56	0.69	-3.81
LQ5	0.33	-3.36	0.21	-3.57	0.24	-3.95
RQ1	0.57	-2.60	0.68	-2.71	1.09	-2.82
RQ2	0.44	-2.48	0.52	-2.61	0.72	-2.81
RQ3	0.63	-0.54	0.50	-0.66	0.40	-0.71
RQ4	0.56	-2.88	0.49	-2.90	0.31	-2.49
RQ5	0.23	-3.12	0.29	-2.89	0.50	-2.67

车站结构侧墙的主应力反应幅值随着地表倾角的增加呈现出增大的趋势,结构上坡向侧墙的应力反应幅值均明显大于下坡向侧墙对应位置的应力反应幅值,上坡向侧墙底部 LQ5 监测点位置处的应力反应最大,因此,以此处为例具体分析两种结构左右侧墙的应力差异。当地表倾角分别为 2°、4°和 6°时,装配式结构左右侧墙底部(LQ5 和 RQ5)最大应力比值分别为 1.08、1.24、1.48,地表倾角越大,最大应力的比值越大,这是由于地表存在倾角时,地铁车站结构周围土体将发生向下坡向滑移现象,结构两侧的动土压力产生差异,地表倾角越大,结构左侧受到的动土压力越大造成的。

4.2 地铁车站结构横向变形分析

图 11 所示为输入地震动峰值加速度为 0.25g 时不同倾角可液化场地中装配式地铁车站结构的最大横向相对位移曲线。由图 11 可知,随着地表倾角的增加,装配式地铁车站结构的最大相对横向位移逐渐增加,当地表倾角为 2°时,车站结构的恒强相对位移较小;当地表倾角增加至 4°时,车站结构的横向相对位移明显增大;当地表倾角为 6°时,横向相对位移进一步增加,并且结构的剪切变形明显增大;这是由于地表倾角越大,结构左侧(上坡向一侧)土体剪切变形将直接影响到结构的变形,导致结构剪切变形加重。

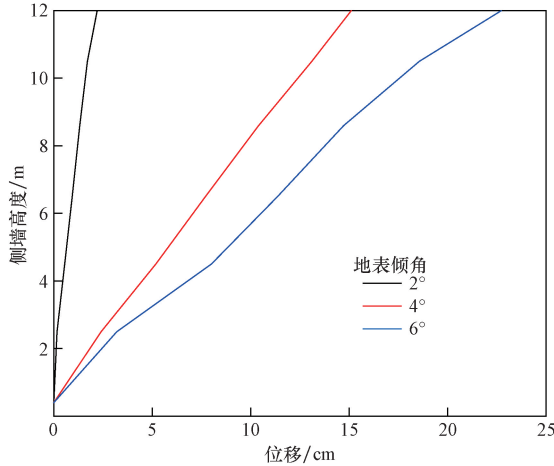


图 11 结构最大横向相对位移曲线
Fig. 11 Maximum lateral relative displacement curve of the structure

4.3 地铁车站结构上浮分析

图 12 所示为输入地震动峰值加速度 0.25g 时装配式地铁车站结构底板不同位置处竖向位移曲线,同时,表 5 所示为结构底板两侧上浮量差(B1 ~ B9)。由此可知,在地震动作用下,地表倾角越大,上浮量差值越大,说明装配式地铁车站受倾斜可液化场地地震液化引起的上浮影响较小。当地表倾角为 0°时,车站结构上浮过程中发生了轻微的逆时

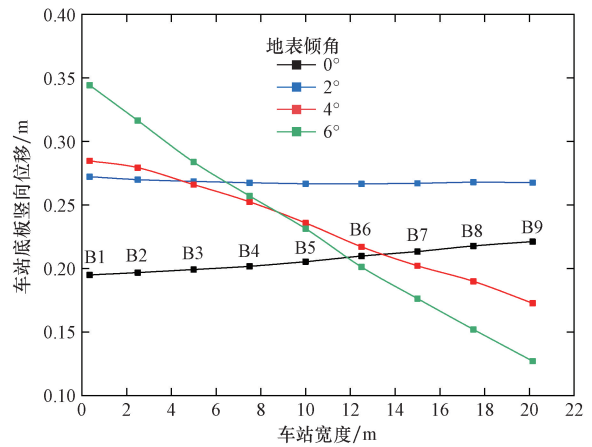


图 12 车站结构底板竖向位移
Fig. 12 Vertical displacement of the base plate of the station structure

表 5 地铁车站结构两侧竖向位移差 (B1 ~ B9)

Table 5 Difference in vertical displacements on both sides of the metro station structure (B1 ~ B9)

地表倾角/(°)	0	2	4	6
位移差/cm	-2.63	0.46	11.81	21.72

针方向偏转,这是由于地震波的不对称性,导致结构在上浮的过程中发生偏转^[19]。随着坡度的增加,车站结构开始发生顺时针方向偏转,并且坡度越大其偏转越大,倾覆现象越明显。由表 5 也可以看出,车站结构底板两侧竖向位移差值随着地表坡度的增加而增大,说明地表倾角越大,结构向下坡向(顺时针)倾覆现象越明显。

5 结论

基于长春地铁 2 号线双丰站工程背景,建立了倾斜可液化地层-装配式地铁车站结构相互作用数值分析模型,研究了不同地表倾角地基孔隙水压力、地基液化土体侧移,地下结构的动力响应与上浮特征等地震反应规律,得到如下主要结论。

- (1) 装配式结构两侧的土体出现了明显的负孔压现象,且地表倾角越大负孔压现象越明显;距离车站结构越远,土体超孔压比越大,液化现象越明显,土体下坡向一侧的液化现象比上坡向一侧明显。
- (2) 地表倾角越大,各工况下土体侧向位移越大;与自由场工况相比,装配式地铁车站结构对地基液化土体侧向位移均有抑制作用,距离车站结构越近,抑制作用越明显。
- (3) 当地表倾角为 0°和 2°时,装配式地铁车站结构底板两侧上浮差值较小;随着地表倾角的增加,车站结构均出现不均匀上浮,引起结构发生倾覆现象,且地表倾角越大,倾覆现象越明显。

参 考 文 献

- [1] An J H, Liu Q F, Zhang Y H, et al. Seismic response comparisons of prefabricated and cast *in-situ* subway station structures in liquefiable site[J]. Buildings, 2023, 13(12): 3071.
- [2] Tao L J, Shi C, Ding P, et al. Shaking table test of the effect of an enclosure structure on the seismic performance of a prefabricated subway station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2022, 125: 104533.
- [3] Liu H T, Wang Z Y, Du X L, et al. The seismic behaviour of pre-cast concrete interior joints with different connection methods in assembled monolithic subway station [J]. Engineering Structures, 2021, 232(2): 111799.
- [4] 杜修力, 刘洪涛, 路德春, 等. 装配整体式地铁车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 38-47.
Du Xiuli, Liu Hongtao, Lu Dechun, et al. Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 38-47.
- [5] Ding P, Tao L J, Yang X R, et al. Three-dimensional dynamic response analysis of a single-ring structure in a prefabricated subway station[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45: 271-286.
- [6] 陶连金, 曹乾坤, 石城, 等. 场地类别对装配式地铁车站结构地震响应的影响[J]. 隧道建设, 2022, 42(3): 378-387.
Tao Lianjin, Cao Qiankun, Shi Cheng, et al. Seismic responses of prefabricated metro stations built at different sites[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 378-387.
- [7] 江志伟, 杨秀仁, 李霞. 强震区装配式和现浇地铁车站结构地震响应对比研究[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 164-173.
Jiang Zhiwei, Yang Xiuren, Li Xia. Response comparisons of pre-cast and cast-*in-situ* subway station structures in the high seismic intensity region [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(1): 164-173.
- [8] 安军海, 闫宏锦, 赵志杰, 等. 地铁车站结构上穿可液化土层地震响应分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7080-7088.
An Junhai, Yan Hongjin, Zhao Zhijie, et al. Seismic response analysis of liquefiable soil layer on subway station structure [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 7080-7088.
- [9] 陈继华, 庄海洋, 王伟. 表面倾斜可液化地基变形特性振动台试验研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(8): 6-10, 29.
Chen Jihua, Zhuang Haiyang, Wang Wei. Shaking table tests on deformation properties of the cone-shaped liquefaction foundation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(8): 6-10, 29.
- [10] 王瑞, 庄海洋, 陈国兴, 等. 地面微倾斜可液化场地中地铁地下车站结构的反应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(2): 130-140.
Wang Rui, Zhuang Haiyang, Chen Guoxing, et al. Seismic response of subway underground station buried in liquefiable soil foundation with the ground surface slight inclined[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(2): 130-140.
- [11] 庄海洋, 周家甫, 陈苏, 等. 微倾斜可液化场地中地铁地下结构地震反应的振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 46-56.
Zhuang Haiyang, Zhou Jiapu, Chen Su, et al. Earthquake responses of subway underground structures buried in a liquefiable foundation with a slight inclined ground surface by the shaking table test [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(2): 46-56.
- [12] 邱宇, 张西文, 扈萍, 等. 缓倾斜液化场地地铁车站结构变形分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(6): 727-733.
Qiu Yu, Zhang Xiwen, Hu Ping, et al. Structure deformation analysis of subway stations in gently inclined liquefaction sites[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2023, 37(6): 727-733.
- [13] 闫冠宇, 许成顺, 张梓鸿, 等. 局部液化夹层场地土-结构接触特性对地下结构地震响应的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S1): 3643-3653.
Yan Guanyu, Xu Chengshun, Zhang Zihong, et al. Influence of soil-structure interface characteristics on seismic response of underground structure in the local liquefaction interlayer site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3643-3653.
- [14] 王凯. 装配式地铁地下车站结构的地震易损性分析[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
Wang Kai. Seismic vulnerability analysis of assembled subway underground station structure [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [15] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望 [J]. 隧道建设, 2021, 41(11): 1849-1870.
Yang Xiuren. Development status of and outlook for construction technology for prefabricated metro stations in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1849-1870.
- [16] 杨秀仁, 黄美群, 林放. 地铁车站预制装配式结构注浆式榫槽接头弯曲抵抗作用特性研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 33-40.
Yang Xiuren, Huang Meiqun, Lin Fang. Research on bending resistance characteristics of grouted mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 33-40.
- [17] Martin G R, Seed H B, Finn W D L. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(5): 423-438.
- [18] 窦远明, 郑姝妍, 王建宁, 等. 远场地震动作用下地铁车站结构动力响应分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 321-327.
Dou Yuanming, Zheng Shuyan, Wang Jianning, et al. Dynamic response analysis of subway station structure under far field ground motion [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 321-327.
- [19] 史明, 陶连金, 王志岗. 液化场地中地下共建车站地震响应分析[J]. 铁道标准设计, 1-9. [2024-11-30]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202310120009>.
Shi Ming, Tao Lianjin, Wang Zhigang. Seismic response analysis of underground co-located stations in liquefaction sites [J/OL]. Railway Standard Design, 1-9. [2024-11-30]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202310120009>.