

大型十字交叉地铁车站结构地震响应分析*

Analysis of Structural Seismic Response of Large-scale Cross-crossing Metro Stations

梁旭华¹, 刘 杨², 李雨润^{2,3}

(1. 唐山市市政建设总公司, 河北 唐山 063000; 2. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401;
3. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要: 本文通过数值模拟的方法开展实际工程地下结构地震响应分析。以天津某软土地下十字换乘地铁车站工程为背景, 建立穿越体系 (Cr)、单体车站 (Ss-2)、单体车站 (Ss-4) 和自由场 (Ff) 四种数值模型, 通过改变地震波类型和幅值来探究软土地下十字换乘地铁车站与单体车站地震响应规律的异同。结果表明: 相比于单体车站结构, 十字换乘车站体系对土体加速度放大效应有着更明显的抑制作用; 不同车站模型位移、应力和加速度均不相同, 同一模型不同车站其响应规律也不同, 当罕遇地震来临时, 车站换乘段容易出现失稳破坏, 总体来看, 十字换乘车站稳定性要优于单体车站。

关键词: 十字交叉车站; 穿越体系; 静-动力人工边界; 地震响应

中图分类号: TU921 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0106-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.021

LIANG Xuhua¹, LIU Yang², LI Yurun^{2,3}

(1. Tangshan Municipal Construction Corporation, Tangshan 063000, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
3. Hebei Civil Engineering Technology Research Centre, Tianjin 300401, China)

Abstract: In this paper, the seismic response analysis of underground structures of actual projects is carried out by numerical simulation. With the background of a cross-interchange underground station project in a soft soil site in Tianjin, four numerical models, namely, crossing system (Cr), single station (Ss-2), single station (Ss-4) and free field (Ff), are established to investigate the similarities and differences of the seismic response of cross-interchange underground station and single station in soft soil site by changing the seismic wave types and amplitudes. The results show that: compared with the monolithic station structure, the cross-over station system has a more obvious inhibition effect on the acceleration amplification effect of the soil; the displacement, stress and acceleration of different station models are different, and the response law of different stations with the same model is also different; when the rare earthquakes come, the interchange section of the station is prone to be destabilised and damaged, and the stability of the interchange station is better than that of monolithic station in general.

Keywords: crossover stations; crossing system; static-dynamic artificial boundaries; seismic response

* 基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2023202028)。

作者简介: 梁旭华 (1973—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水处理工程。

通信作者: 刘 杨 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2024-03-28

0 引言

近几年,随着地下空间的开发与利用,许多城市建设十字换乘地铁车站。然而,十字交叉换乘地铁车站结构与传统的单体车站在结构形式方面有很大不同,由此二者的动力响应规律也有很大的不同。我国大多数已建换乘型地铁位于城市繁华地段,人口密集,一旦发生破坏后果不堪设想,因此对于十字换乘地铁车站结构地震响应规律的研究十分有必要。

地下空间结构抗震研究发展历程虽短,但相关成果十分丰富。Wang 等^[1]对垂直入射 S 波作用下,黏弹性土层上的地铁站与附近桩基表面结构之间的动态穿土相互作用进行了数值研究,重点研究相邻地表结构的存在对地下结构地震响应的影响;Hashash 等^[2]通过离心机实验和相应的数值模拟评估了邻近中层或高层建筑对明挖回填隧道结构和支撑开挖的地震响应的影响;Farghaly^[3]探讨了地铁隧道对附近十层以上框架结构动力响应的影响;Abate 和 Massimino^[4-6]研究了隧道对土壤和建筑物地震响应的影响;苏健等^[7]以十字交叉换乘地铁站为研究对象,借助 Midas - GTS 建立三维有限元分析模型,采用动力时程方法分析水平与竖向地震动荷载下车站结构的地震响应规律,并将单向与双向耦合地震动荷载下的结构响应进行比较;韩学川等^[8]基于 ABAQUS 软件建立了大开洞连体并行地铁地下车站结构的三维有限元数值模型,进行了此类车站的非线性地震反应特性差异研究;郝鹏飞等^[9]主要探究了在考虑不同地震动类型以及幅值、不同地震动输入方向等因素影响下,换乘车站的地震响应规律以及空间效应;于仲洋等^[10]利用振动台试验方法探究十字交叉型地铁车站结构的地震动传播特性,以及十字交叉型车站结构的地震响应特性。

目前,对复杂换乘车站结构与单体结构的动力响应规律差异问题的研究相对较少,很多人仅仅研究了相互穿越体系的地震响应规律,但忽略了其体系与单体结构有何异同。因此,通过十字穿越体系与单体结构相对比,探究十字换乘车站结构与单体车站结构地震响应规律的异同。

1 结构有限元模型

1.1 工况设置

为探究十字换乘车站与单体车站地震响应规律的异同,以某工程为例,建立换乘车站 (Cr)、单体车站 (Ss - 2)、单体车站 (Ss - 4) 和自由场 (Ef) 4 种模型,通过输入不同地震波和幅值来研究其地震响应规律。在选波方面,采用 El - Centro 波、Kobe 波和天津人工波;在幅值方面,采用 0.1g 和 0.3g 峰值加速度两种,由于实际工程位于 III 类场地,0.1g 对应 7 度设防烈度,0.3g 对应 8 度设防烈度。

1.2 模型网格划分

工程位于十字路口,人口密集,附近建筑林立,车站属于岛式车站,结构形式为钢筋混凝土结构,车站埋深为 3.75 m,采用明挖法(局部盖挖)施工,梁、板、墙采用 C35 混凝土,中柱采用 C45 混凝土,体现强柱弱梁思想,围护结构为 0.8 m 厚地下连续墙。其中 2 - 3 换乘车站总长度为 252.6 m,车站标准宽度为 21.7 m,车站高度为 13.5 m;3 - 3 换乘车站总长度为 139 m,车站标准宽度为 28.7 m,车站高度为 21.9 m,结构横剖面图如图 1 所示。

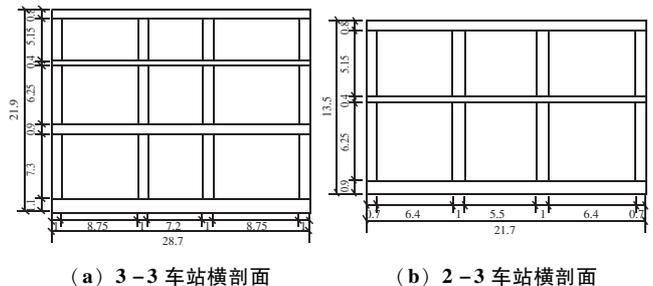


图 1 十字换乘车站结构横剖面图

Fig. 1 Cross - section of the cross - interchange station structure

2 - 3 换乘车站与 X 向平行分布,3 - 3 换乘车站与 X 向垂直分布,依据《城市轨道交通结构抗震设计规范》,土体模型计算尺寸初步确定为 365 m × 144 m × 90 m。为了方便后续数据对比和处理,故将 X 向和 Y 向尺寸设为一致,土体计算尺寸确立为 365 m × 365 m × 90 m。

为了保证地震波能够在模型底部准确输入,要求模型网格尺寸不易过大或者过小,一般要求其网格尺寸要小于波长的 1/10,土体网格尺寸取为 4 m,局部加密部位尺寸为 2 m,车站网格尺寸为 2 m,由

建筑结构

于在模型计算中容易出现应力集中现象，因此，网格单元类型选择 C3D8 单元，如图 2 所示。

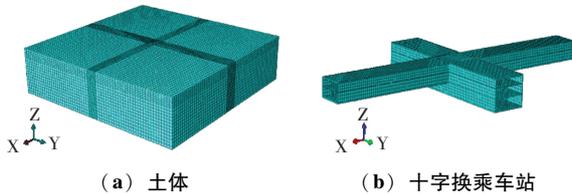


图 2 模型网格划分
Fig. 2 Model meshing

1.3 土体参数

图 3 为工程土层分布位置纵向示意图，软土地中十字换乘地铁站结构周围土层大致可分为 5 层，土体本构模型采用的是修正的 Davidenkov 黏弹塑性本构模型，土层参数见表 1。

表 1 土层参数设置
Table 1 Soil layer parameter settings

| 土层序号 | 土层名称 | 层厚 /m | 动剪切模量 /MPa | 泊松比 | 密度 / (kg/m ³) |
|------|------|-------|------------|------|---------------------------|
| 1 | 杂填土 | 7.00 | 27.83 | 0.25 | 1890 |
| 2 | 粉质黏土 | 11.80 | 39.61 | 0.35 | 1990 |
| 3 | 粉质黏土 | 20.60 | 50.93 | 0.35 | 2010 |
| 4 | 粉土 | 21.70 | 65.82 | 0.35 | 2040 |
| 5 | 细砂 | 18.90 | 69.92 | 0.30 | 2080 |

1.4 模型边界条件及约束

边界条件采用静 - 动力人工耦合边界，分析步

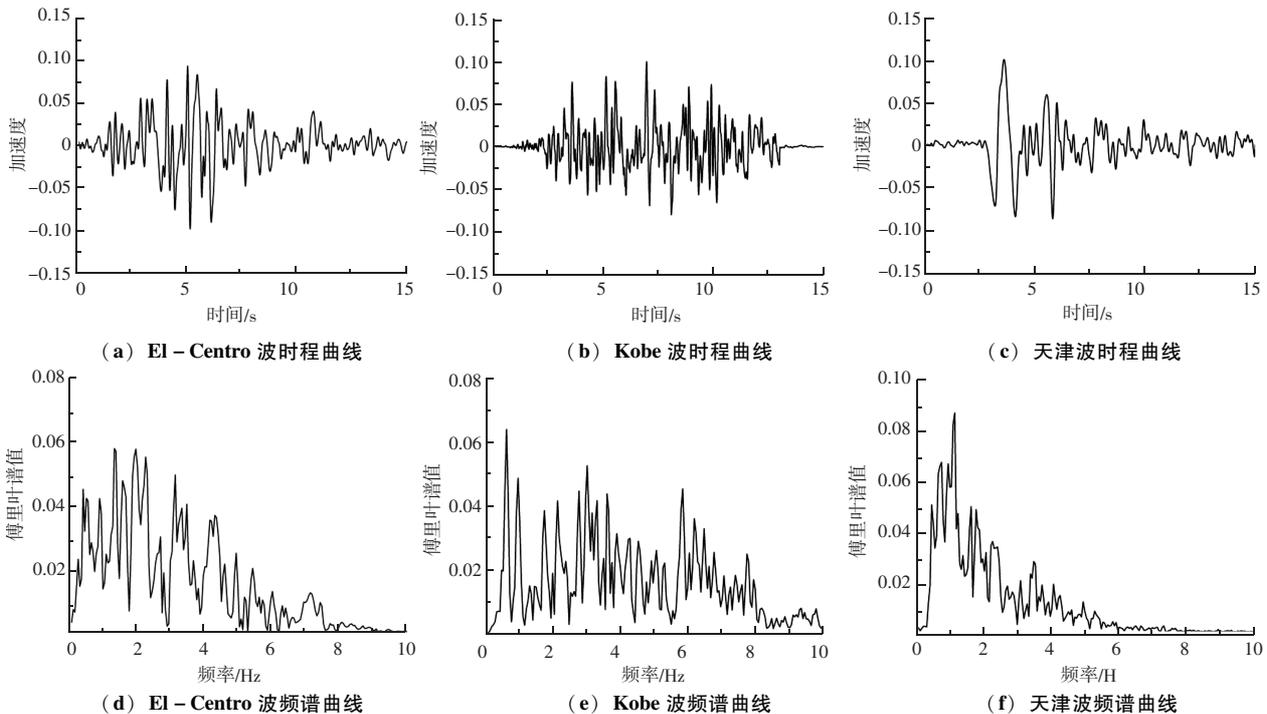


图 4 0.1g 峰值加速度作用下不同地震波波波形图
Fig. 4 Waveforms of different seismic waves under the effect of 0.1g peak acceleration

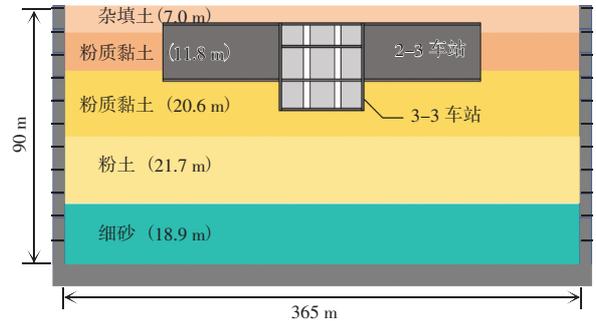


图 3 土层分布示意图
Fig. 3 Schematic distribution of soil layers

采用显示动力分析步，计算时显示动力分析步设置为土体的顶面完全自由，不施加任何约束，对土体的底部和四周边界进行约束。当地震波纵向输入时，将 X 方向释放，其他方向保持约束。以纵向一致地震输入为主，研究换乘车站和单体车站的地震响应规律，建模时各类部件之间采用“tie”接触法，法向采用硬接触，切向采用“罚”接触；刚度大的部件定义为主面，刚度小的部件定义为从面。

1.5 地震波的选择

输入 0.1g 和 0.3g 峰值加速度的 El - Centro 波、Kobe 波和天津波，为节省篇幅，仅展示 0.1g 工况，如图 4 所示。

2 地震响应分析

2.1 土体响应

为研究土体的加速度变化以及土体位移的变化，在土体中部沿纵向距离（X 向）设置位移观测点，用来观测地表土体竖向位移的变化；在距离十字换乘车站结构 8 m 处设置加速度观测点，用来观测加速度随土体深度的变化。

2.1.1 土体加速度响应

为了研究地震动峰值加速度在不同模型中土体的放大系数，根据加速度放大系数的定义，加速度放大系数等于土体深度 n 处峰值加速度与基岩层地震动峰值加速度的比值，由此来得出不同幅值地震作用下土体峰值加速度放大系数随土体深度变化的曲线，0.1g 和 0.3g 作用下土体加速度放大系数随深度变化曲线如图 5 所示。从整体来看，各工况加速度放大系数变化规律基本一致，整体基本呈现 S 形分

布变化，变化幅度相对较大，土体峰值加速度放大系数基本处在 0.5 ~ 3.0 之间；从单体角度来看，不同模型之间加速度放大系数变化程度也不同，其中 2 个单体车站模型加速度放大系数均大于十字换乘穿越体系；从整体抑制效果来讲，相比于单体车站结构，十字换乘车站体系对土体加速度放大效应有着更明显的抑制作用。

通过改变地震波幅值，土体加速度放大系数最大逐渐增大至 3.0，尽管出现了小幅度的放大，但从整体来看，放大变化程度不大，但随着土体深度的增大，0.3g 作用下土体加速度放大系数衰减的速度相比于 0.1g 工况逐渐变快，这是由于随着幅值的增大，放大系数的衰减率随着幅值的增大而减小，土体传播地震动的能力在减弱^[11]。

2.1.2 土体竖向位移响应

4 种模型不同工况下地表竖向位移曲线图如图 6 所示。不同模型的竖向位移趋势不尽相同，但竖向

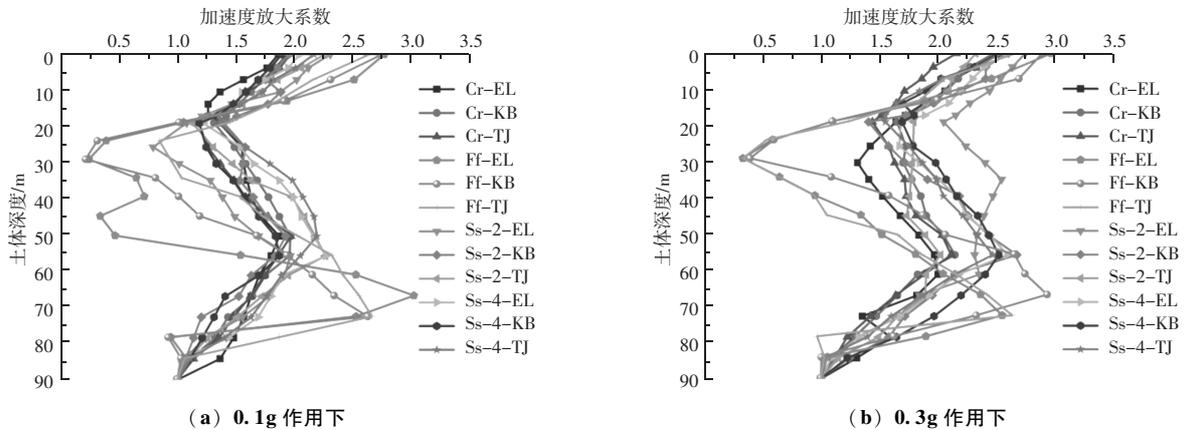
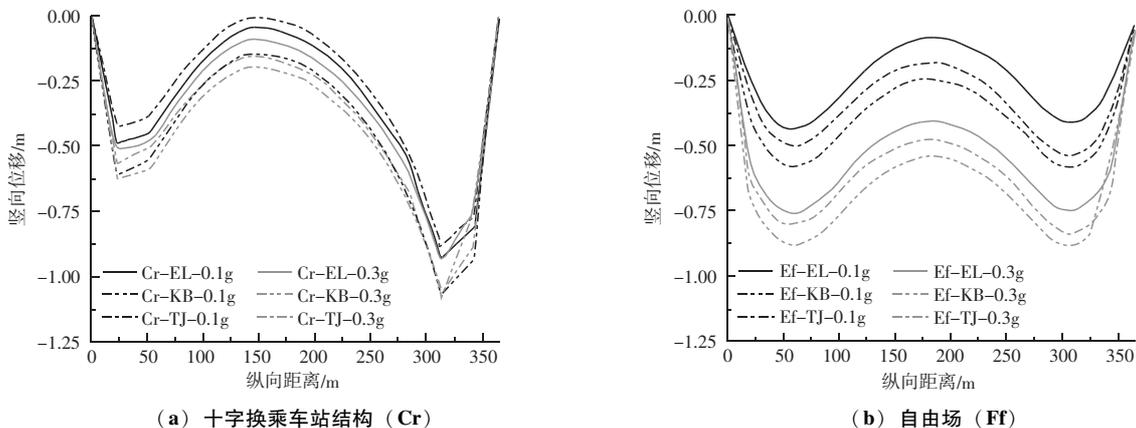


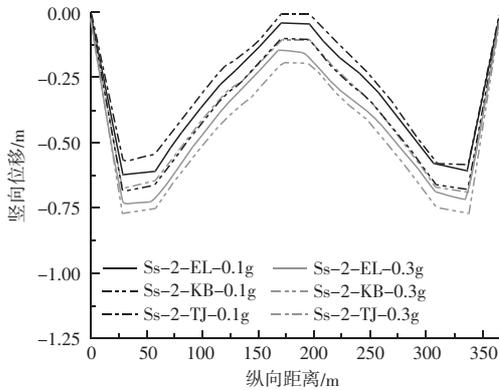
图 5 土体峰值加速度放大系数随深度变化曲线
Fig. 5 Curve of amplification factor of peak soil acceleration with depth



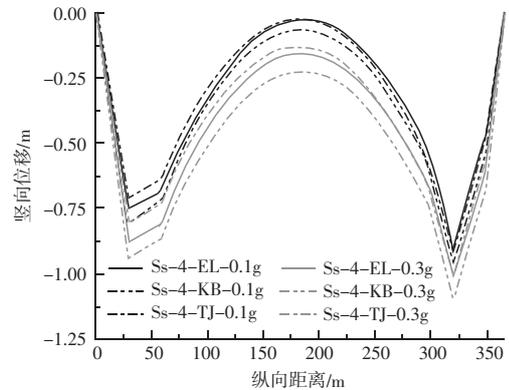
(a) 十字换乘车站结构 (Cr)

(b) 自由场 (Ff)

建筑结构



(c) 单体车站 (Ss-2)



(d) 单体车站 (Ss-4)

图6 不同模型不同工况下地表竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement of the ground surface under different working conditions for different models

位移最大值均发生在土体两侧位置, 土体中部位置土体均出现了上浮的现象, 其他3个模型上浮程度均小于自由场模型, 这是由于地下结构自身抵抗的结果。从根本上来讲, 结构在一定程度上抵抗了土体变形; 从整体来看, 自由场模型位移变化幅度最大, 其次是单体车站 (Ss-4), 单体车站 (Ss-2) 变化幅度最小, 这可能是由于此车站分布位置与地震波输入方向不同造成的, 整个车站以侧面抵抗了地震波的冲击, 导致土体变化幅度较小。

2.2 车站响应

从加速度和位移两个方面研究车站地震响应规律。加速度测点沿两个车站高度进行选取, 位移观测路径主要为沿车站侧墙纵向分布。

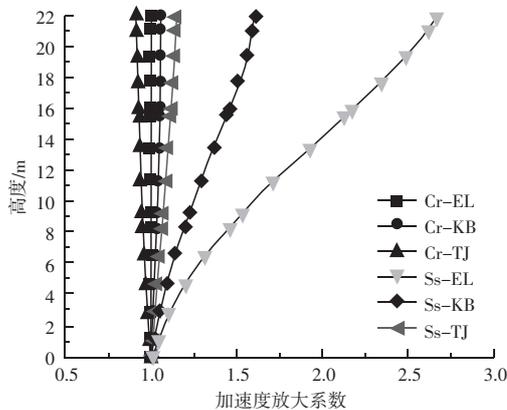
2.2.1 车站加速度响应

图7为0.1g和0.3g作用下不同模型不同工况车站加速度放大系数曲线。

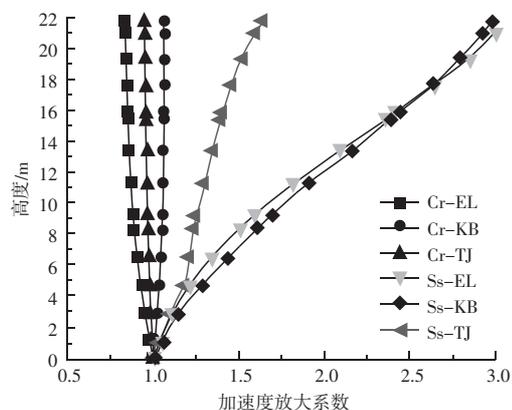
从图中可知, 各工况下车站结构加速度放大系

数曲线变化趋势基本相同, 对于3-3车站而言, 其加速度放大系数曲线相对比较平滑, 并且单体车站模型各工况的加速度放大系数远大于十字换乘体系, 最大可达到2.98倍; 然而2-3车站规律与3-3车站有所不同, 其加速度放大曲线从整体来看, 相对蜿蜒曲折, 随车站高度变化幅度较大, 加速度最大值大约发生在车站负1层顶部和负2层中部的的位置, 并且十字换乘车站模型的加速度放大系数大于单体车站。

随着幅值的增大, 无论是单体车站还是十字换乘车站, 它们的加速度放大系数都随之相应增大, 由此说明幅值对车站加速度有很大影响。其中EL-Centro波作用下的车站加速度放大系数最大, 与之相比, Kobe波和天津波作用下的加速度放大系数相对较小, 由此也可说明车站加速度与地震波的频谱特性也有很大的关系。



(a) 0.1g 作用下的 3-3 车站



(b) 0.3g 作用下的 3-3 车站

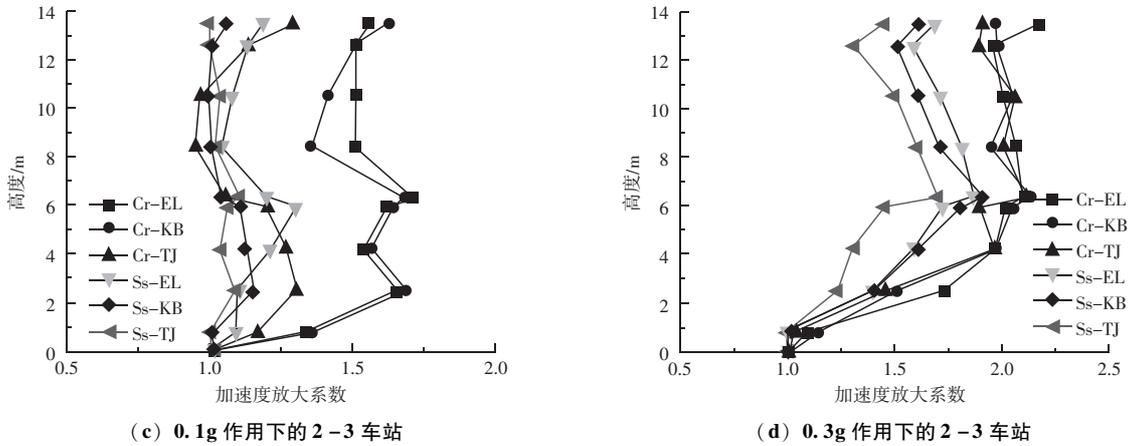


图 7 0.1g、0.3g 作用下不同模型不同工况车站加速度放大系数曲线

Fig. 7 Acceleration amplification coefficient curves of different models for different working conditions at 0.1g、0.3g

2.2.2 车站位移响应

图 8 分别为不同工况十字换乘车站模型车站侧墙相对水平位移。为应对未来发生超设防烈度地震，地震动峰值加速度增设一组为 0.4g，以此来模拟罕遇地震作用下十字换乘车站体系的地震响应规律。

从图中可知，2-3 车站在 0.4g 峰值加速度地震波作用下，车站中部换乘段出现了位移幅度过大现象，这很有可能是由于开洞截面的存在，当罕遇地震来临时，结构的侧向刚度不足以支撑整体车站的稳定性要求，因此，出现了位移幅度过大的现象。

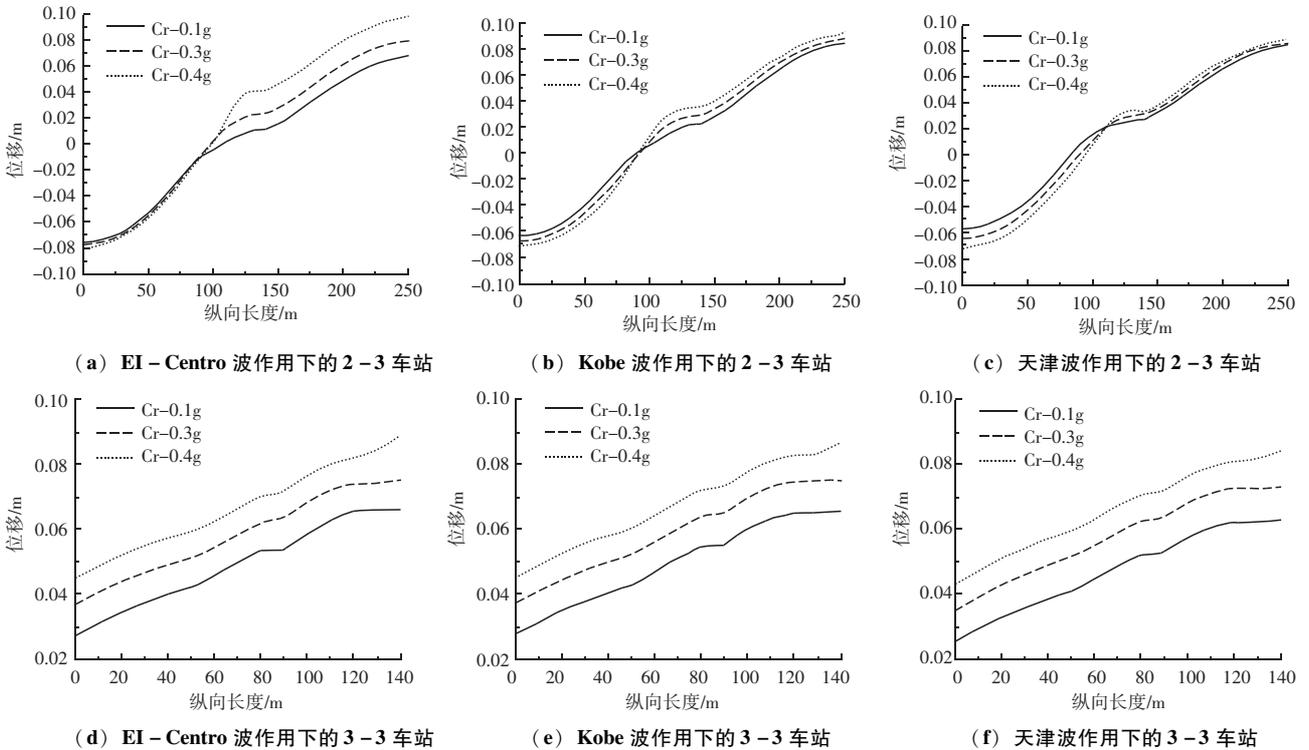


图 8 不同地震波不同峰值作用下十字换乘地铁车站侧墙相对水平位移变化曲线

Fig. 8 Relative horizontal displacement curves of sidewalls in cross-interchange metro stations under different peaks of different seismic waves

在十字换乘体系中，由于 2-3 车站的存在，使得车站两侧发生了更明显的位移，在不同地震波作用下，十字换乘体系侧墙相对位移曲线变化趋势基

本类似，与 2-3 车站相比，3-3 车站整体相对位移比较平稳，位移幅度没有出现过大的现象，整体稳定性较为良好，但地震波是沿 2-3 车站纵向输入，

建筑结构

地震波输入方向也是导致结构是否稳定的一个重要前提。

3 结论

通过建立了十字换乘车站 (Cr)、单体车站 (Ss - 2)、单体车站 (Ss - 4) 和自由场 4 种模型, 设置不同工况, 研究了十字换乘车站体系与单体车站在不同加速度幅值、不同频谱特性的地震波作用下的地震响应规律, 根据数值计算结果, 得到以下结论:

(1) 当地震来临时, 土体都会产生不同程度的放大效应, 无论是单体车站还是换乘车站都在一定程度上对土体加速度的放大存在“阻碍”作用, 从整体抑制效果来讲, 相比于单体车站结构, 十字换乘车站体系对土体加速度放大效应有着更明显的抑制作用。

(2) 4 个模型土体中部位置土体均出现了上浮的现象, 其他 3 个模型上浮程度均小于自由场模型, 这是由于地下结构自身抵抗的结果, 从根本上来讲, 还是结构在一定程度上抵抗了土体变形。因此在保证地下结构以及周围建筑物安全的前提下, 建设小型地下结构可作为提高周围土体稳定性的一种安全措施。

(3) 对于 3 - 3 车站, 单体车站模型各工况的加速度放大系数远大于十字换乘体系, 最大可达到 2.98 倍。然而 2 - 3 车站的加速度放大曲线相对蜿蜒曲折, 随车站高度变化幅度较大, 加速度最大值大约发生在车站负 1 层顶部和负 2 层中部的的位置, 并且它的十字换乘车站模型的加速度放大系数大于单体车站模型。

(4) 不同车站模型侧墙相对位移变化均不相同, 当罕遇地震来临时, 中间换乘段出现了位移幅度过大的现象, 这可能是开洞截面的存在, 导致结构侧向刚度不足以抵抗高烈度地震来临时的破坏力, 很有可能造成结构的失稳破坏。

参 考 文 献

- [1] WANG H F, LOU M L, ZHANG R L. Influence of presence of adjacent surface structure on seismic response of underground structure [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100: 131-143.
- [2] HASHASH Y M, DASHTI S, MUSGROVE M, et al. Influence of tall buildings on seismic response of shallow underground structures [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144 (12): 04018097.
- [3] FARGHALY A A. Seismic analysis of high rise building with deep foundation constructed near deep channel [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 19 (N): 3099-3124.
- [4] ABATE G, CORSICO S, MASSIMINO M R. FEM modelling of the seismic behavior of a tunnel - soil - aboveground building system: a case history in Catania (Italy) [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 158: 380-385.
- [5] ABATE G, MASSIMINO M R. Parametric analysis of the seismic response of coupled tunnel - soil - aboveground building systems by numerical modelling [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15: 443-467.
- [6] ABATE G, MASSIMINO M R. Numerical modelling of the seismic response of a tunnel - soil - aboveground building system in Catania (Italy) [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15: 469-491.
- [7] 苏健, 李达琨, 许民泽, 等. 十字交叉换乘地铁车站地震响应分析 [J]. *沈阳建筑大学学报 (自然科学版)*, 2023, 39 (5): 820-827.
- [8] 韩学川, 陶连金, 刘春晓, 等. 连体并行地铁车站结构地震响应分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46 (8): 929-939.
- [9] 郝朋飞, 王国波, 赵旭, 等. 大型十字换乘车站结构地震响应及空间效应分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42 (1): 180-190.
- [10] 于仲洋, 张鸿儒, 邱滢佳, 等. 十字交叉型地铁车站结构的振动台试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40 (9): 142-151.
- [11] 刘春辉, 翁建燎, 孔璟常, 等. 地震波对干砂场地土层加速度放大系数影响分析 [J]. *地震工程学报*, 2022, 44 (6): 1287-1293.