

文章编号: 1005-0523(2023)04-0016-08



地下连续墙对无柱大跨地铁车站地震反应影响

许紫刚^{1,2}, 李淳宇^{1,2}, 夏宗尧^{1,2}

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013
2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 无柱大跨地铁车站抗震设计是否考虑地下连续墙的影响尚未有统一结论。基于 ABAQUS 有限元数值分析软件, 建立了土-结构静动力耦合有限元模型, 分析了水平竖向双向地震作用下, 地下连续墙对无柱大跨地铁车站结构动力反应的影响。数值分析表明: 地下连续墙会增大无柱大跨地铁车站体系的水平抗侧刚度, 考虑地下连续墙时车站侧墙的总体水平相对变形降低; 但地下连续墙的存在会放大无柱大跨地铁车站上覆土体的竖向惯性效应, 同时也会使得无柱大跨地铁车站内力重分布。考虑地下连续墙时车站底板端部是抗震薄弱环节, 抗震设计中应对其进行适当加强。

关键词: 地铁车站; 大跨度; 无柱; 地下连续墙; 地震反应

中图分类号: U216

文献标志码: A

本文引用格式: 许紫刚, 李淳宇, 夏宗尧. 地下连续墙对无柱大跨地铁车站地震反应影响[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 16-23.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.007

Influence of Diaphragm Wall on Seismic Response of Column-Free Large-Span Subway Station

Xu Zigang^{1,2}, Li Chunyu^{1,2}, Xia Zongyao^{1,2}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Whether the diaphragm wall should be considered in the seismic design of the column-free large-span subway station has not been uniformly determined. Based on the finite element numerical analysis software ABAQUS, the soil-structure static and dynamic coupling finite element models are established to analyze the influence of diaphragm wall on the seismic response of column-free large-span subway station under horizontal and vertical earthquake load. The results show that the diaphragm wall can improve the lateral stiffness of the column-free large-span subway station system, and the horizontal relative deformation of the side wall is reduced when the diaphragm wall is considered. However, the existence of diaphragm wall will magnify the vertical inertia effect of the overlying soil of the subway station, and also make the internal force of the subway station redistribute. When the diaphragm wall is considered, the end of the bottom slab is a weak seismic link, which should be properly strengthened in the seismic design.

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52108453); 江西省自然科学基金青年项目(20212BAB214014); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200636); 江西省交通运输厅科技项目(2021Z0004)

Key words: subway station; large-span; column-free; diaphragm wall; seismic response

Citation format: XU Z G, LI C Y, XIA Z Y. Influence of diaphragm wall on seismic response of column-free large-span subway station[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 16–23.

地下结构历史震害表明,地铁车站、隧道等地下结构在地震作用下存在破坏的可能,甚至完全塌毁,例如1995年日本阪神地震中大开地铁车站的倒塌破坏^[1]。过去针对地下结构抗震性能开展的数值分析和试验研究主要集中在单层或双层的单柱双跨或双柱三跨的地下结构^[2],主要发现地下结构本身受到的惯性效应不是地震作用下地下结构受到的主要地震荷载,结构两侧场地土体的水平剪切变形和结构上覆土体的竖向惯性效应是影响地下结构抗震安全的重要因素^[3]。同时认为,中柱是地铁地下车站结构抗震薄弱环节^[4]。

为了满足车站建筑使用功能,在保证安全的前提下,地铁工程建设领域开始探索取消中柱的设置,提出无柱大跨地铁车站结构体系。无柱大跨地铁车站空间布局更灵活,且车站通透性更好,有利于客流通行。目前,有学者对无柱大跨地铁车站的抗震性能进行研究,讨论了无柱地铁车站的基本抗震性能及其抗震薄弱部位^[5-6]。然而在目前关于无柱大跨地铁车站抗震性能的研究中,通常没有考虑地下连续墙的影响,简单认为地下连续墙是车站结构抗震设计的安全储备^[7]。王雪剑等^[8]通过数值分析探讨了地下连续墙对某一双层三跨地铁车站抗震性能的影响。考虑到无柱大跨地铁车站与传统车站在地震反应和抗震薄弱环节等方面的差异,有必要探讨地下连续墙对无柱大跨地铁车站抗震性能的影响。

综上所述,本文以实际无柱大跨地铁车站为背景,分别建立了土-无柱大跨地铁车站体系和土-地下连续墙-无柱大跨地铁车站体系的整体动力时程分析有限元模型,系统研究了不同等级水平和竖向双向地震作用下,地下连续墙对地铁车站加速度、水平变形和地震损伤的影响。研究结果可为无柱大跨地铁车站结构抗震设计提供指导。

1 有限元计算模型

1.1 模型概况

本研究选取某无柱大跨地铁车站作为研究对

象,车站总宽度20.7 m,总高度14 m。车站顶板厚1.1 m,侧墙厚1.0 m,底板厚0.9 m,中板厚0.7 m。顶板与侧墙连接处设有大腋角加腋处理。车站主体结构尺寸及配筋如图1所示,配筋单位为mm。车站左右两侧设有0.8 m厚,30 m高的地连墙。车站顶板埋深为5 m,地表至基岩位置总厚度为80 m。

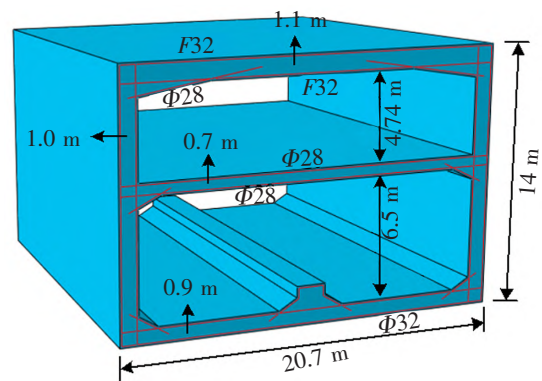


图1 车站主体结构尺寸及配筋
Fig.1 Size and reinforcement of the main station

1.2 材料参数及地震动参数

土-车站结构整体动力分析有限元模型如图2所示,同时,取车站结构两侧不设置地下连续墙的情况作为对照模型。模型场地总宽度150 m,大于车站结构宽度的7倍。场地土层一共分为9层,土体的本构模型采用庄海洋等^[9]提出的黏塑性本构模型,土体主要模型参数如表1所示。

在本数值模型中,车站结构混凝土型号取为C50,地下连续墙混凝土型号取为C30,两者内部的钢筋型号均选为HRB400。混凝土通过建立平面应变单元进行模拟,并采用ABAQUS中的塑性损伤模型(CDP),该模型通过引入受拉损伤因子和受压损伤因子来描述受拉和受压后混凝土的刚度变化^[10]。C50和C30型号混凝土的弹性模量分别取34.5 GPa和30 GPa,峰值抗压强度分别取32.4 MPa和20.1 MPa,峰值抗拉强度分别取2.67 MPa和2.03 MPa。钢筋通过建立桁架单元进行模拟,并采用理想弹塑性本构模型,初始弹性模量取200 GPa,泊松比取0.3,屈服应力为335 MPa。

表 1 土层参数
Tab.1 Soil parameters

| Soil | Thickness/m | Density/(kg/m ³) | Shear wave velocity/(m/s) | Poisson's ratio | Cohesion/kPa | Internal friction angle/(°) |
|------|-------------|------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | 3 | 1 840 | 140 | 0.49 | 13.5 | 16 |
| 2 | 6 | 1 900 | 152.7 | 0.49 | 15.4 | 26 |
| 3 | 6 | 2 050 | 167.1 | 0.49 | 7.0 | 30 |
| 4 | 8 | 1 940 | 158.5 | 0.49 | 18.8 | 16 |
| 5 | 7 | 2 090 | 172.7 | 0.49 | 5.0 | 28 |
| 6 | 10 | 2 120 | 205.8 | 0.49 | 5.0 | 30 |
| 7 | 11 | 1 890 | 236.3 | 0.49 | 12.3 | 28 |
| 8 | 14 | 2 050 | 263.2 | 0.49 | 6.2 | 30 |
| 9 | 15 | 1 930 | 491.6 | 0.49 | 21.0 | 21 |

此外,土体也采用平面应变单元进行模拟。钢筋通过嵌入的方式置于车站主体或地下连续墙中,数值计算过程中不考虑钢筋和热混凝土之间的滑移。

土体和车站结构以及地下连续墙之间需要设置接触,其中法向接触均采用 ABAQUS 中的“硬”接触,允许两者之间产生分离;切向接触采用 ABAQUS 中的罚函数模拟,设置摩擦系数为 0.4^[11]。此外,对于设有地下连续墙的有限元模型,本模型将其考虑为叠合墙式结构,即车站结构侧墙与地下连续墙之间协同运动,不产生相对位移,两者之间设置绑定连接^[8]。在图 2 所示的有限元模型中,地震动输入采用振动输入方法,场地顶部自由、底部固定、左右两侧施加粘弹性人工边界条件,并考虑自

由场效应^[12]。

本文选取文献[8,13]中列举的 2 条加速度时程曲线,即 EL Centro 地震动和 Kobe 地震动作为输入地震动,同时考虑场地地震安评情况,共选取 3 条地震动,其加速度时程记录如图 3 所示,输入的地震动持续时间均截取为 40 s。为考虑不同强度地震动的影响,分别将 3 条地震动加速度记录的峰值调整为 0.05g、0.1g、0.2g、0.4g,g 为重力加速度。同时考虑水平和竖向双向地震作用,竖向地震动加速峰值简单考虑为水平向地震动加速度峰值的 2/3。本研究开展的有限元分析主要包括两个分析步,首先是采用静力分析步,对模型施加重力荷载;其次是采用动力隐式分析步,对模型施加水平和竖向的双向地震荷载。

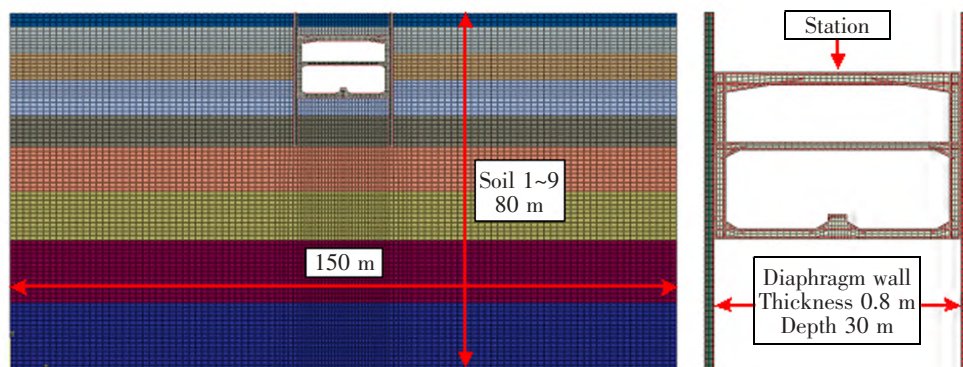


图 2 有限元分析模型
Fig.2 Finite element analysis model

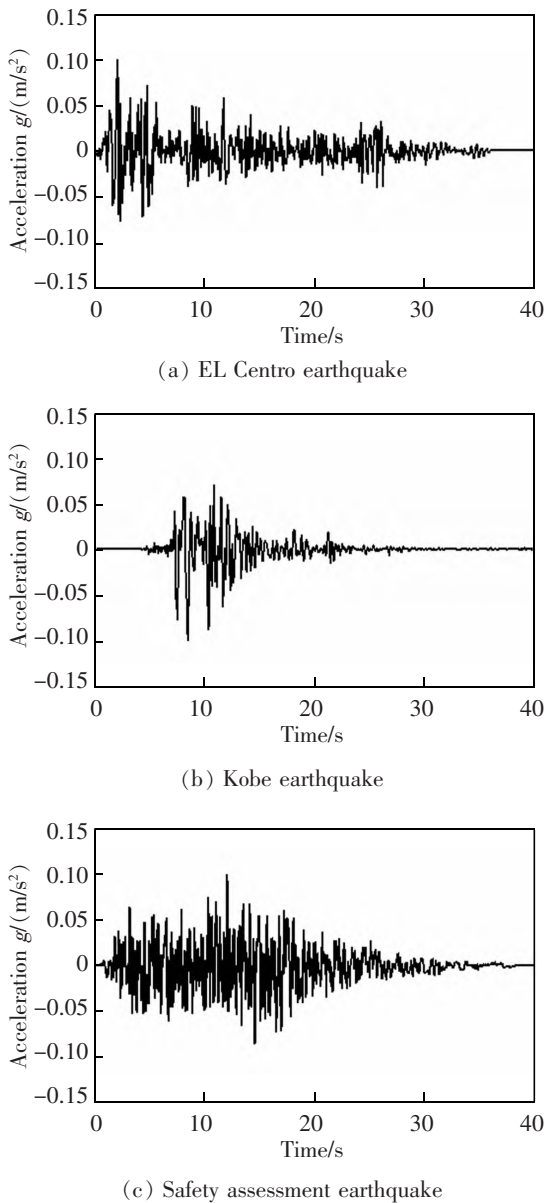
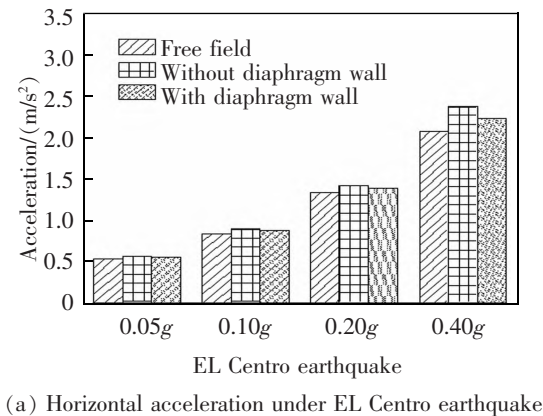


图 3 输入地震动加速度时程
Fig.3 Acceleration time-history of input earthquake



2 计算结果分析

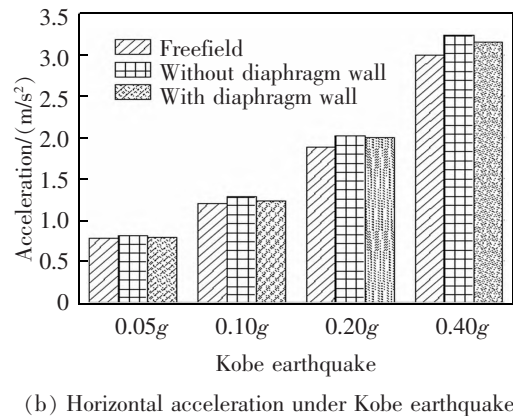
2.1 车站结构中心加速度

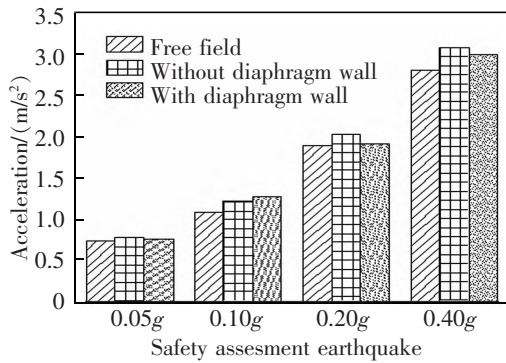
无柱大跨地铁车站结构两侧的地下连续墙埋深一般较深,双向地震作用下,场地-地下连续墙-车站结构之间是一个复杂的相互作用体系。图 4 分别给出了不同地震动幅值情况下,结构中心位置处的水平和竖向加速度反应的峰值,同时与自由场工况下结构中心位置对应土体节点的加速度反应进行对比。由图 4 可知,车站中心位置的加速度比对应位置处自由场的加速度反应都略大,而当考虑地下连续墙时,车站中心位置的加速度比不考虑地下连续墙时要小。此时,地下连续墙可以起到减轻结构水平惯性力的作用,然而,地下结构水平惯性力并不是其所受的主要地震荷载。当考虑地下连续墙时,车站中心处的竖向加速度比不考虑地下连续墙和自由场都要大。

对于峰值 0.4g 的 EL Centro 地震动而言,有地连墙时的竖向加速度是无地连墙时的 1.3 倍。由此可知,当考虑地连墙时,结构上覆土体的竖向惯性力也会呈现增大的趋势,而根据杜修力等^[3]的研究结果,浅埋地下结构上覆土体竖向惯性力是影响结构抗震性能的重要影响因素。

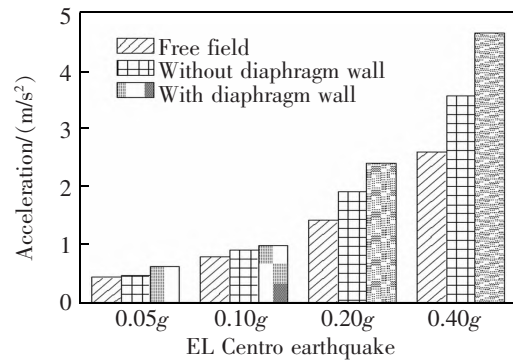
2.2 车站结构水平变形

车站结构的水平变形是评价其抗震安全性能的重要指标之一。图 5 给出了有无地下连续墙时地铁车站顶底板相对位移最大时刻所对应的结构水位位移沿结构高度的变化曲线。当不考虑地下连续墙时,侧墙的水平相对变形基本呈现 S 形,这与王雪剑等^[8]的研究结论一致。当考虑地下连续墙时,由于本研究在车站侧墙和地下连续墙之间设置了绑定约束,地震作用下,地下连续墙和侧墙同步运动

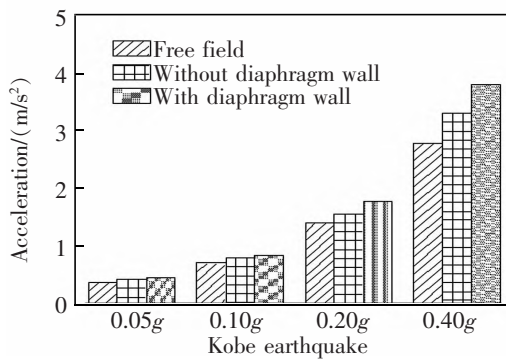




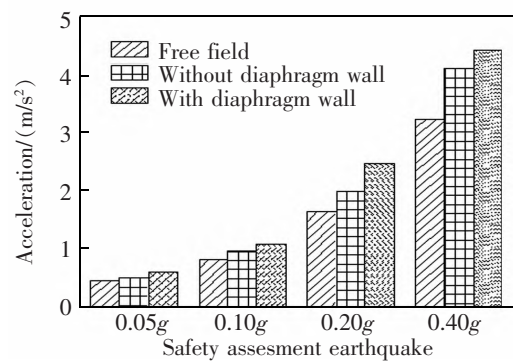
(c) Horizontal acceleration under safety assessment earthquake



(d) Vertical acceleration under EL Centro earthquake



(e) Vertical acceleration under Kobe earthquake



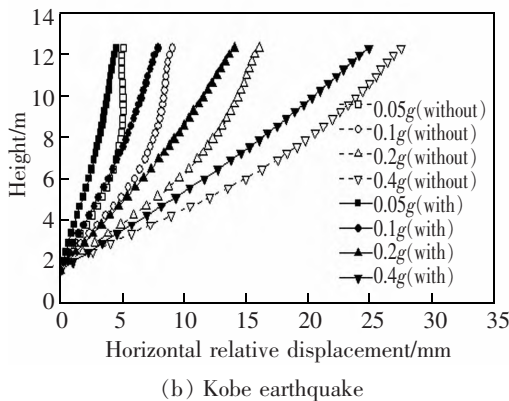
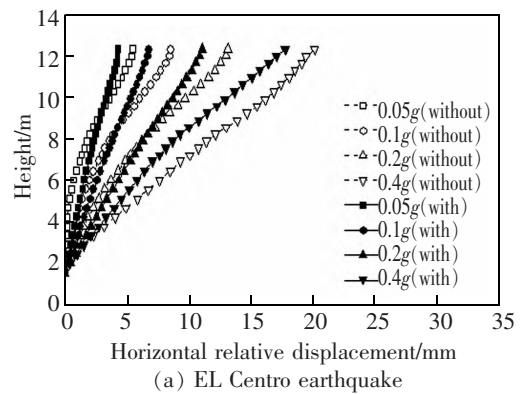
(f) Vertical acceleration under safety assessment earthquake

图4 结构中心位置处加速度峰值

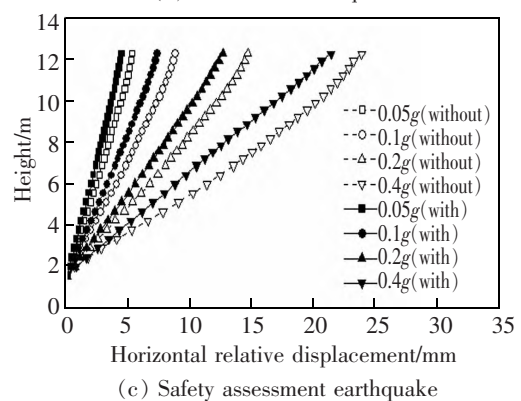
Fig.4 Peak acceleration at the center of the structure

地下连续墙加大了侧墙的抗侧刚度,使得侧墙的水平相关变形基本呈现斜直线。总体上,考虑地下连续墙时,可有效提高车站结构体系的抗侧刚度,车站顶底板之间的相对水平位移要比不考虑地下连续墙时小,并且这种减小趋势随着地震动峰值强度的提高而更加明显。

然而,需要说明的是,车站结构上层和下层的层间位移角并不呈现统一的变化趋势。图6给出了



(b) Kobe earthquake



(c) Safety assessment earthquake

图5 车站侧墙相对位移

Fig.5 Relative displacement of the side wall

图 5 对应时刻下车站结构上层和下层的层间位移角对比情况。考虑地下连续墙时,车站结构下层的层间位移角比不考虑地下连续墙要小很多,极大程度上保护了下层结构的水平向抗震性能。但是,对于车站上层结构而言,地下连续墙的存在反而使得层间位移角变大。产生这一现象的原因可能与车站结构所处的土层材料属性有关。

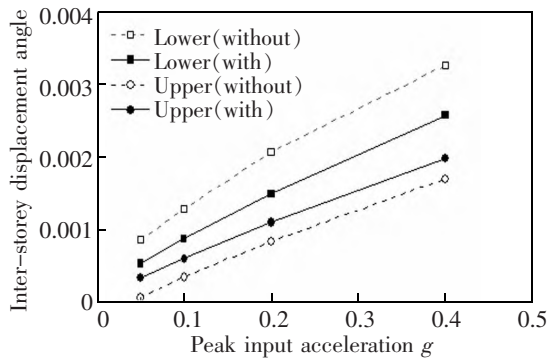


图 6 Kobe 地震动作用下车站层间位移角
Fig.6 Inter-storey displacement angle of the station under Kobe earthquake

2.3 车站结构地震损伤

图 7 给出了有无地下连续墙时车站主体结构的受拉损伤云图,以进一步解释地下连续墙对无柱大跨地铁车站结构动力反应的影响。受篇幅限制,本节以 0.1g 和 0.4g Kobe 地震动作用下结构受拉损伤为例进行说明,当受拉损伤因子为 0 时,表示该部分混凝土未出现拉损伤,处弹性工作状态;当受拉损伤因子为 1 时,表示该部分混凝土已经完全受拉开裂。由图 7 可以看出,当不考虑地下连续墙时,侧墙顶底部的受拉损伤较为严重,尤其是当地震动变强时,侧墙底部破坏单元完全贯通,表明该截面可能完全受拉破坏;当考虑地下连续墙时,小震情况下侧墙基本保持弹性工作状态,即使提高地震动强度,侧墙的受拉损伤区域也没有显著的改变。因此,地下连续墙可以有效地保护无柱大跨地铁车站的侧墙,使其基本保持在弹性工作状态。

然而,对比是否考虑地下连续墙时顶板和底板的损伤可以发现,考虑地下连续墙时,无柱大跨地铁车站的抗震薄弱环节已经从侧墙顶底部转移至

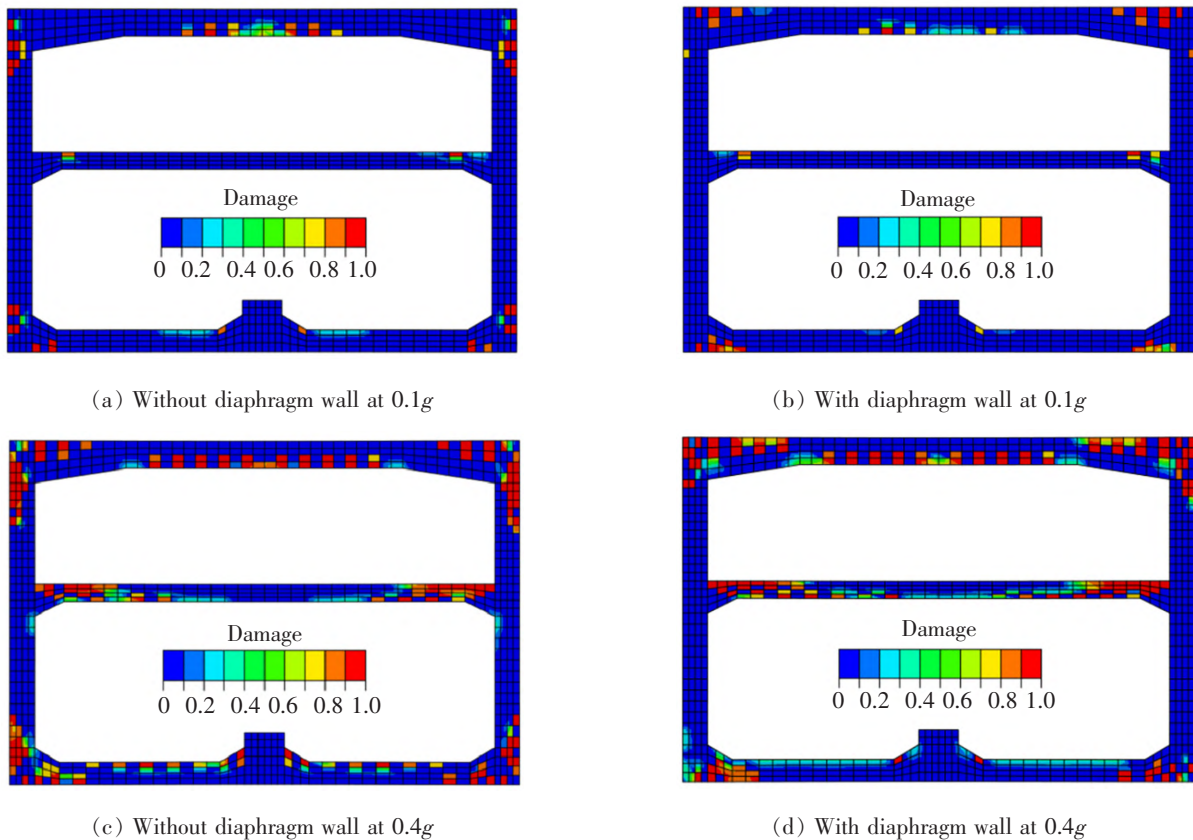


图 7 Kobe 地震动作用下车站受拉损伤
Fig.7 Tensile damage of station under Kobe earthquake

顶底板的端部,以底板的端部更为明显。例如,0.4g Kobe地震动作用下,有地下连续墙的地铁车站底板左端出现完全受拉破坏。图8给出了车站底部左端部单元 Mises 应力时程曲线,考虑地下连续墙时底板左端部单元的 Mises 应力峰值约为不考虑地下连续墙时的 1.3 倍。为进一步分析产生这一现象的原因,图9给出了不考虑地下连续墙时左侧墙受到的土体摩擦力时程曲线,以及考虑地下连续墙时左侧地下连续墙受到的土体摩擦力时程曲线,后者峰值约是前者峰值的 1.5 倍。而地下连续墙所受过大土体摩擦力会对车站底板或顶板产生受拉破坏。

总体来说,传统观念认为的地下连续墙的存在是地铁车站结构抗震设计的安全储备这一理念并不完全正确。地下连续墙的存在会明显放大无柱大跨地下地铁车站的上覆土体竖向惯性效应,尽管地下连续墙的存在可以提高车站结构体系的水平抗侧刚度,并有效保护侧墙的抗震安全性能,但地下连续墙的存在会使得地震荷载作用下车站结构的内力发生重分布现象,车站结构抗震薄弱环节转移

由侧墙顶底部转移至顶底板的端部,对顶底板的受力产生不利影响。因此,对于无柱大跨地铁车站结构在大震情况下要充分考虑到地下连续墙的影响,必要时需要加强顶板和底板的端部以提高车站结构的整体抗震性能,例如在地下结构周围设置弹性模量较低的减震层材料,以达到减轻地铁车站主体结构地震损伤的目的^[4]。

3 结论

1) 地下连续墙对无柱大跨地铁车站水平加速度反应无明显影响,但会明显放大无柱大跨地铁车站上覆土体的竖向惯性效应。

2) 地下连续墙可提高无柱大跨地铁车站体系的整体抗侧刚度,考虑地下连续墙时车站侧墙的总体水平相对变形降低。

3) 地下连续墙的存在使得无柱大跨地铁车站发生内力重分布现象,考虑地下连续墙时车站底板端部是抗震薄弱环节,抗震设计中应对其进行适当加强,例如在地铁车站周边设置减震层等。

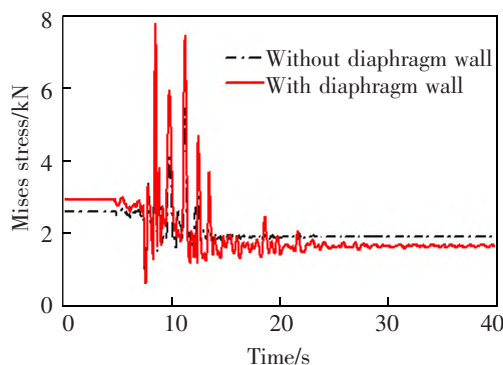


图8 车站底板左端部单元 Mises 应力时程曲线
Fig.8 Mises stress time-history curves of the element at left end of station bottom slab

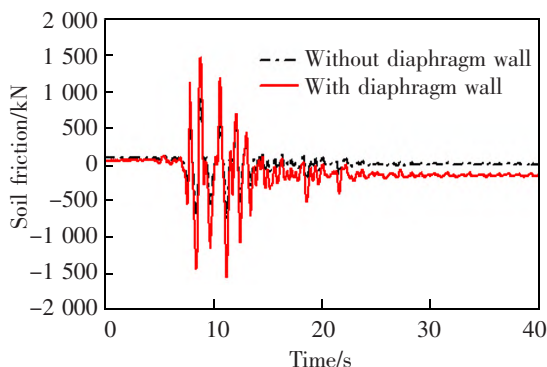


图9 土体摩擦力时程曲线
Fig.9 Time-history curves of soil friction

参考文献:

- [1] 杜修力,李洋,许成顺,等. 1995年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报,2018,40(2):223-236.
DU X L,LI Y,XU C S,et al. Review on damage causes and disaster mechanism of daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(2):223-236.
- [2] 路德春,马超,杜修力,等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(10):1469-1483.
LU D C,MA C,DU X L,et al. Earthquake resilience of urban underground structures[J]. Scientia Sinica Technologica,2022,52(10):1469-1483.
- [3] 杜修力,许紫刚,许成顺,等. 浅埋地下结构地震反应分析的惯性力-位移法[J]. 岩土工程学报,2018,40(4):583-591.
DU X L,XU Z G,XU C S,et al. Inertia force-displacement method for seismic analysis of shallow buried underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(4):583-591.
- [4] 杜修力,马超,路德春,等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报,2017,50(1):53-62.
DU X L,MA C,LU D C,et al. Collapse simulation and

- failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(1):53-62.
- [5] 杨磊,陈雁,贾少东,等. 无柱大跨地铁车站抗震性能试验与分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(5):674-683.
- YANG L, CHEN Y, JIA S D, et al. Shaking table test and analysis on the seismic performance of pillarless large-span metro station[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 52(5):674-683.
- [6] 李岩龙. 砂卵石地层不同结构型式大跨无柱地铁车站的抗震动力响应分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(3):107-111.
- LI Y L. Seismic dynamic response analysis of large-span non-column metro station with different structure forms in sandy pebble stratum[J]. *Urban Mass Transit*, 2021, 24(3):107-111.
- [7] ZHUANG H Y, HU Z H, CHEN G X. Numerical modeling on the seismic responses of a large underground structure in soft ground[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(2):802-815.
- [8] 王雪剑,庄海洋,陈国兴,等. 地下连续墙对叠合墙式地铁车站结构地震反应的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8):1435-1443.
- WANG X J, ZHUANG H Y, CHEN G X, et al. Effect of diaphragm wall on earthquake responses of an underground subway station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8):1435-1443.
- [9] ZHUANG H Y, HU Z H, WANG X J, et al. Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modelling[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 13(12):3645-3668.
- [10] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998(4):892-903.
- [11] BOBET A, FERNANDEZ G, HUO H, et al. A practical iterative procedure to estimate seismic-induced deformations of shallow rectangular structures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(7):923-938.
- [12] 杜修力,李洋,赵密,等. 下卧刚性基岩条件下场地土-结构体系地震反应分析方法研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(5):52-59.
- DU X L, LI Y, ZHAO M, et al. Seismic response analysis method for soil-structure interaction system of underlying rigid rock base soil condition[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(5):52-59.
- [13] 付继赛,庄海洋,王旭,等. 地下连续墙连接方式对地铁车站结构地震反应的影响研究[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(6):42-50.
- FU J S, ZHUANG H Y, WANG X, et al. Influence of diaphragm wall connection mode on earthquake response of subway station structure[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(6):42-50.
- [14] 朱雪立,王伟,庄海洋. 基于侧向地基回填隔离震层的两层三跨地铁地下车站结构抗震性能分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(3):165-175.
- ZHU X L, WANG W, ZHUANG H Y. Seismic performance of the two-layer three-span subway underground station structure with lateral foundation backfill isolation layer[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(3):165-175.



通信作者:许紫刚,男(1992—),讲师,博士,研究方向为工程结构抗震。E-mail:xuzigang1027@163.com。

(责任编辑:姜红贵)