

DOI: 10.11779/CJGE201708010

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

王雪剑¹, 庄海洋^{*1, 2}, 陈国兴¹, 王 瑞¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程与防灾减灾重点实验室, 江苏 南京 210009)

摘要: 针对现行地铁地下车站结构的常见叠合墙式结构设计方法和抗震分析方法中不考虑地下连续墙存在的现实情况, 基于数值计算方法, 建立了土-地下连续墙-地下结构静动力耦合非线性相互作用有限元分析模型, 分析了地下连续墙存在时对地铁地下车站主体结构地震反应的影响规律。研究结果表明: 地下连续墙的存在对地铁车站主体结构的抗水平侧移能力有一定的提高作用, 使得其顶底间的最大相对位移有显著减小。从这一结果出发, 似乎可以认为地下结构抗震分析中不考虑地下连续墙时可看作是地下结构的地震安全储备。但是, 地下连续墙的存在明显改变地下结构的整体变形性态, 进而导致地下结构的内力发生重分布, 尤其使得大震时车站结构的顶、中、底板一些关键部位的地震损伤程度明显比不考虑地下连续墙时要严重; 同时, 地下连续墙对车站结构顶底板表面与土体间的相对摩擦剪力也产生明显的影响。

关键词: 地下结构; 地下连续墙; 抗震性能; 地震损伤; 土与结构相互作用

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)08-1435-09

作者简介: 王雪剑(1990-), 硕士研究生, 主要从事地铁地下结构抗震研究。E-mail: xuejian_20072007@126.com。

Effect of diaphragm wall on earthquake responses of an underground subway station

WANG Xue-jian¹, ZHUANG Hai-yang^{1, 2}, CHEN Guo-xing¹, WANG Rui¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Jiangsu Civil Engineering & Disaster Prevention and Reduction Key Laboratory, Nanjing 210009, China)

Abstract: At present, the diaphragm wall is always used as the partial side wall of the underground subway station. However, the diaphragm wall is always neglected in the seismic design of an underground structure for that it is looked as a reserved safety for its earthquake resistance. To verify this opinion, a finite-element model is established to simulate the static and dynamic coupling interaction among the soil, the diaphragm wall and the underground subway station. The effects of the diaphragm wall on the earthquake responses of the underground subway station are investigated and analyzed. As a result, the diaphragm wall can increase the lateral deformation stiffness of the underground structure, which reduces the relative lateral seismic deformation of the underground structure. From this point, the seismic design method for the underground structure is conservative. However, the diaphragm wall may also change the seismic deformation characteristics of the underground structure, which will aggravate the earthquake-induced tension damages of the plates of the underground structure under strong earthquakes. Moreover, the diaphragm wall may affect the friction responses on the interaction surfaces between the soils and the underground structure.

Key words: underground structure; diaphragm wall; seismic behavior; earthquake damage; soil-structure interaction

0 引言

强震区城市地铁轨道交通系统的抗震性能对于维护其结构、功能的安全、生命安全、震后修复与重建等都至关重要。由于地铁地下结构发展较晚, 绝大多数地铁地下结构都还未经受过地震的严峻考验。但是, 1995年日本阪神地震中大规模地铁地下车站及其区间隧道的严重破坏给人们敲响了警钟^[1-3]。目前, 对地下结构的地震破坏机理和抗震设计方法的研究还难以

满足强震区地铁地下工程的防震减灾需求, 尤其是对浅埋于复杂场地中地铁地下结构与周围地层间的动力相互作用机理、地震破坏模式和灾变过程的认识还明显不足, 进而导致已有地下结构抗震分析方法无法很

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278246), 江苏省自然科学基金面上项目(BK20141458)

收稿日期: 2016-05-03

*通讯作者(E-mail: zhuang7802@163.com)

好满足现行地铁地下结构的抗震设计要求。

已有对地下结构的研究表明^[4-5]: 在发生强地震时, 地下结构的地震反应通常主要取决于周围土体的地震位移场, 结构本身受到的惯性力对地下结构地震反应不是主要的影响因素, 然而周围土体物理状态的变化将明显影响地下结构的地震反应。鉴于此, 地铁地下车站结构侧向地下连续墙的存在也将对地下车站结构的变形特征和破坏特征产生一定的影响。但是, 现行的地下结构抗震分析方法中认为地下连续墙的存在将对地铁车站结构的抗震起到一定的有利作用, 这种看法的主要依据为地下连续墙与地下结构侧墙的结合将明显增强地下结构的抗侧移刚度。因此在相关分析和抗震设计中仅把地下连续墙作为地下结构抗震设计的安全储备^[6-10], 这种做法是否存在问题并没有太多学者去质疑。曾有学者考虑过地下连续墙存在对液化地基中地下结构上浮的影响, 甚至有相关学者开展了深基坑施工期间地下连续墙支护结构的抗震稳定性^[11], 但对地下连续墙对车站主体结构本身的变形特征及其地震损伤等反应的影响并未进行具体研究^[12]。

综上所述, 本文以实际地铁工程为背景, 建立了土-地下连续墙-地下车站结构静动力耦合非线性相互作用体系的有限元分析模型和计算方法, 系统地研究了典型地铁地下车站结构侧向地下连续墙对地下车站主体结构的地震变形特征、动力反应特征、底部输入地震动和地震损伤破坏模式等的影响规律, 初步给出了一些有价值的研究结论和新发现, 研究结果能为地铁地下结构的地震安全性评价和抗震设计等提供重要的科学依据和指导。

1 数值计算方法

1.1 土和混凝土材料的动力本构模型

土体采用庄海洋等^[13]建立的软土记忆型黏塑性嵌套面动力本构模型, 该模型基于广义岩土塑性理论, 采用等向硬化和随动硬化相结合的硬化模量准则, 建立的一个总应力增量形式的土体黏塑性动力本构模

型。该模型已在一些重大课题研究和工程建设中得到了有效地应用和验证。根据本文选取的南京地铁地下车站所处的工程场地条件, 土体主要模型参数如表 1 所示。

地下车站结构所用的混凝土强度为 C30, 混凝土采用 Jeeho Lee 等^[14]提出的黏塑性动力损伤模型, 该模型基于混凝土的断裂能原理, 在 Lubliner 等^[15]提出的塑性损伤模型的基础上进行改进, 分别采用两个损伤变量来描述混凝土受拉和受压破坏时不同的刚度衰减规律, 并采用多个硬化变量来修正模型中的屈服函数, 建立了混凝土在循环荷载作用下的动力塑性损伤本构模型, C30 混凝土对应的动力损伤模型参数见文献[10]。根据工程实际情况, 车站结构和地下连续墙均采用 Q235 钢筋, 其弹性模量为 200 GPa, 不考虑钢筋的非线性及其钢筋与混凝土之间的动力滑移与分离现象。上述材料的阻尼都采用瑞利阻尼法来近似考虑。

1.2 土与结构动力接触的模拟

土与地下结构之间的动力接触通过定义不同介质之间接触表面对 (master-slaver surface, 图 1) 的力学传递特性^[16], 建立接触面力传递的力学模型和接触方程, 通过接触算法求解接触方程, 该方法适用于模拟接触表面发生大位移滑动和接触面分离与闭合不断转化的动力接触问题。本文中当不考虑地下连续墙时, 土与地铁车站结构之间的所有接触面法向接触全部采用“硬”接触, 即认为当土体与地下结构和地下连续墙之间出现拉力时它们之间的接触面将立即分离。切向接触服从 Coulomb 摩擦定律, 当接触面上剪应力大于它们之间的最大摩擦力时将发生土体相对地下结构产生切向滑动, 即

$$\tau_{\text{crit}} = \mu \cdot P. \quad (1)$$

式中 τ_{crit} 为接触面上临界剪应力; μ 为摩擦系数, 根据已有的研究^[17], 本文取 0.4; P 为根据初始应力分析步计算的接触面上法向接触力。本文中当考虑地下连续墙的作用时, 地下连续墙与土体之间采用上述的接触算法。然而, 地铁地下车站结构侧墙与地下连续

表 1 工程场地条件及其参数

Table 1 Geological conditions and physical parameters of engineering site

土层 编号	土性	重度 ($\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹模 /MPa	层厚 /m	动泊松 比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 ($^{\circ}$)	剪切波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	素填土	18.4	8.0	3.1	0.49	13.5	16	140.0
2	软黏土	19.0	10.0	5.9	0.49	15.4	26	152.7
3	粉细砂	20.5	14.5	6.0	0.49	7.0	30	167.1
4	黏土	19.4	12.0	8.0	0.49	18.8	16	158.5
5	中砂	20.9	21.0	7.0	0.49	5.0	28	172.7
6	中砂	21.2	27.8	10.7	0.49	5.0	30	205.8
7	粉质黏土	18.9	33.0	10.8	0.49	12.3	28	236.3
8	砂土	20.5	29.0	13.5	0.49	6.2	30	263.2
9	老黏土	19.3	35.0	15.0	0.49	21.0	21	491.6

墙之间不考虑相对滑动和分离, 即采用地下结构与地下连续墙的“叠合墙”设计方法。同时, 地下连续墙的端部与土体间的接触采用绑定约束。

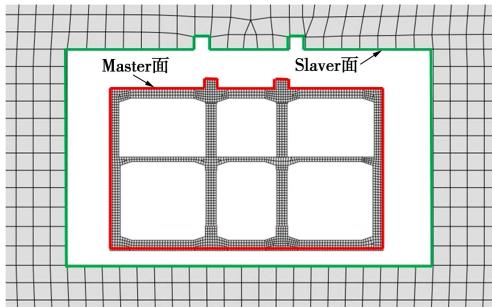


图1 土与结构间的动力接触面模拟方法

Fig. 1 Modelling contact between soil and concrete

1.3 输入地震动

本文选用地震波为 El-Centro 波和 Kobe 波。El-Centro 波为 1940 年美国 Imperial 山谷地震时记录的强震地震波, 该地震波原始峰值加速度为 $0.349g$, 强震部分持续时间约为 26 s。Kobe 波为 1995 年日本阪神地震中神户海洋气象台记录的强震加速度记录, 本文中取其南北向的水平向加速度记录作为基岩输入波, 该地震波的原始峰值加速度为 $0.85g$, 强震部分持续时间约为 10 s, 两条地震波的时程和对应的傅氏谱分别如图 2, 3。在水平基岩上输入地震波时, 把两条地震波的峰值加速度分别调整为 $0.5, 1.0, 2.0 \text{ m/s}^2$, 基岩输入地震波持续时间为 40 s。

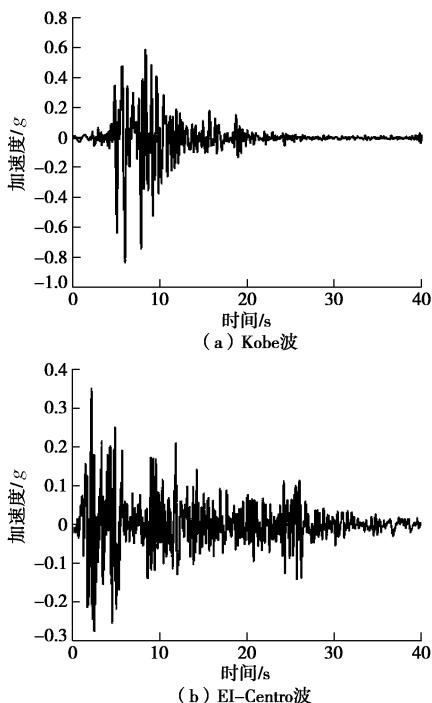


图2 输入地震波时程曲线

Fig. 2 Time histories and acceleration response spectra of El-Centro wave

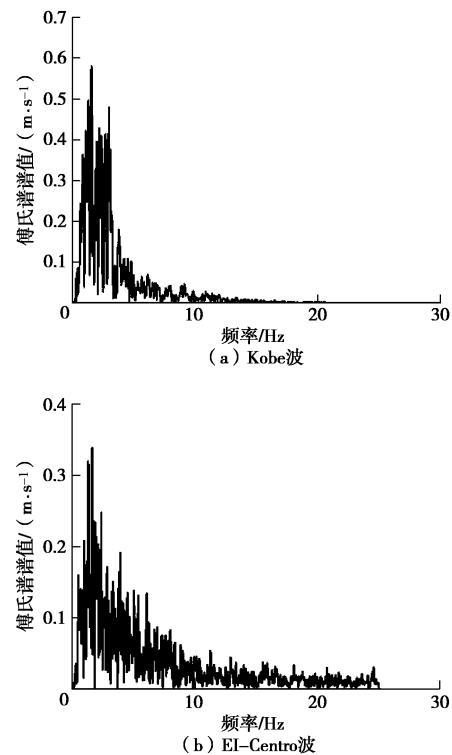


图3 输入加速度时程的傅氏反应谱

Fig. 3 Time histories and acceleration response spectra of Kobe wave

1.4 有限元分析模型

对于完全深埋于土中的地下结构, 其周围近场软土的初始应力状态和物理力学特性明显与远场土体的不同, 周围土体的初始应力状态明显对软土的动力特性产生很大的影响, 这种影响又反过来对地下结构的动力反应产生不可忽视的重要影响。因此, 有必要考虑地铁地下结构周围场地初始地应力条件对土与结构相互作用体系的影响。鉴于此, 庄海洋等^[10, 18]已建立了土-地下结构静动力耦合非线性相互作用有限元分析方法。在该分析方法中, 初始地应力的具体考虑办法就是在动力计算步之前, 先进行场地初始地应力平衡分析, 根据土体单元积分点的应力状态, 利用下式计算动力步中所需的土体初始动剪切模量, 即

$$G_{d0} = \rho V_s^2 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.5}, \quad (2)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (3)$$

式中, G_{d0} 为土体初始动剪切模量, ρ 为土体密度, V_s 为土层剪切波速, p_0 为自由场土层层中位置对应的围压, $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 为土体单元积分点对应的应力状态。

考虑初始静应力条件, 有限元计算分析从静力分析步过渡到动力分析步时, 必须对模型地基的侧向边界条件进行转换。土-地下结构静动力耦合边界的处理技术主要有两种, 一种是以刘晶波等^[19]提出的发展

静—动力统一人工边界的方法为代表。另一种静动力耦合边界处理技术,是在静力分析步中侧向边界采用水平向约束和竖向自由的滚轴边界,在动力分析步中侧向边界采用水平向自由和竖向约束的滚轴边界,在静力分析步向动力分析步转化过程中,把静力分析结束后侧向边界的水平向支座反力采用人工的方法以集中力施加于侧向边界面上的静力水平支座对应的单元结点上,以此来实现静力边界条件向动力边界条件的转化,具体转化过程如图 4。由于第二种方法概念明确且实施容易,因此,本文中对静动力耦合作用下侧向边界的处理采用第二种方法。

基于上述的建模方法和土-地下连续墙-地下结构之间的连接方式,采用 ABAQUS6.10 建立的有限元分析模型如图 5 所示。根据已有的研究,为了尽量消除截取边界的影响,本文的模型地基的宽度取 200 m 和厚度取 80 m,土体采用四节点平面缩减积分单元来离散,车站结构和地下连续墙均采用四节点平面全积分单元来离散,车站结构和地下连续墙内的配筋采用植入的建模方法,钢筋采用等效的二维梁单元进行离散,所有有限单元的特征长度尺寸为 1~2 m 范围内变化。把地铁车站结构等效为平面应变问题时采用了同刚度折减弹性模量的方法来考虑以平面应变单元模拟三维的中柱带来的影响,圆形中柱等效成厚度为 0.8 m 的连续墙。

2 计算结果分析

2.1 地下连续墙对车站结构底地震动的影响

地铁车站结构侧向地下连续墙的埋深通常较大,在土层内将会起到加强体的作用,必然对其间地下结构底部地基的地震反应产生一定的影响。因此,图 6 给出了有墙和无墙时车站主体结构底板底面处的加速度反应谱对比(计算用阻尼比为 0.05)。由图可知,地下连续墙主要对车站结构底部加速度反应谱的短周期范围内(高频成分,大于 2.5 Hz)的谱值有较大的削弱作用,而低频成分(小于 2.5 Hz)的反应基本不受地下连续墙的影响。总体来看,随着输入地震动的变强,地下连续墙的影响也越来越明显。图 7 给出了车站结构底板底面的加速度反应峰值的对比。总体来看,地下连续墙的存在对加速度反应峰值也有明显的削弱作用,且这种削弱作用随着输入地震动的变强而略有变强。

综上所述,造成上述影响规律的主要原因应为:车站主体结构底部的地下连续墙对其间土层的地震反应起一定的约束作用,随着基岩输入地震动的变强,该部位土体的动力软化程度越高(表现在反应谱长周期段的放大效应明显),因此造成地下连续墙对其间土层的约束加强作用越明显。综上所述,从对车站结构底板处加速度反应的影响规律来看,地下连续墙的存

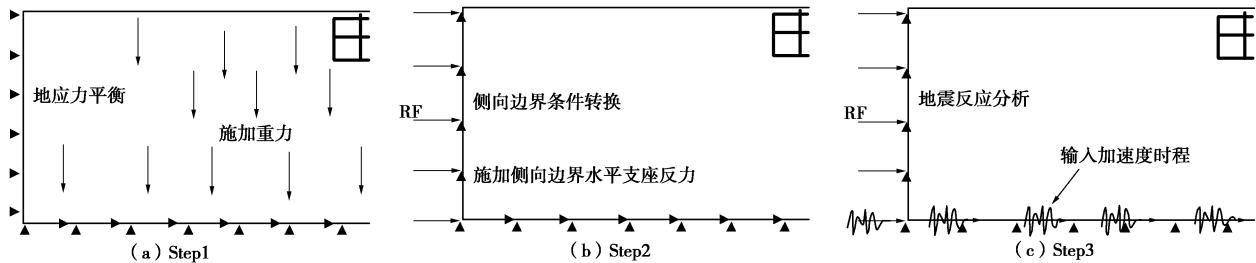


图 4 计算模型边界条件的转换设置

Fig. 4 Changing process of boundary conditions

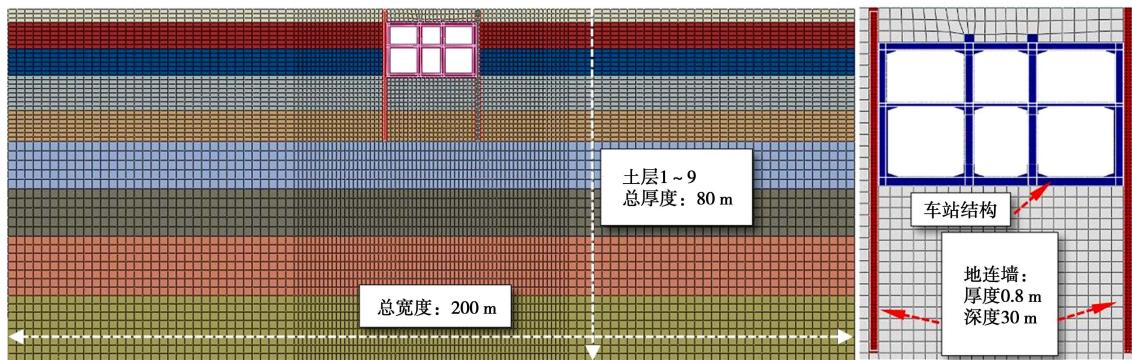


图 5 土-地下连续墙-地下结构相互作用体系的地基有限单元模型

Fig. 5 Finite element model for soil-diaphragm wall-underground structure interaction system

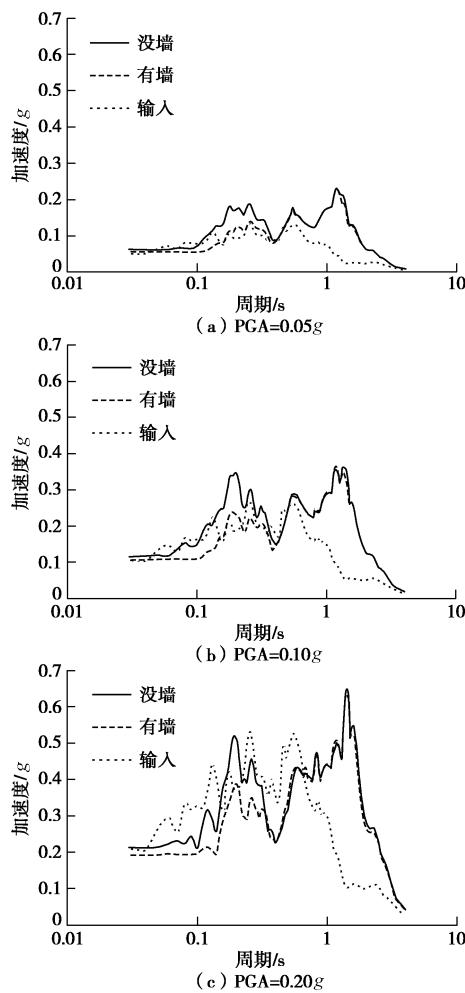


图 6 车站主体结构底板跨中处的加速度反应谱对比

Fig. 6 Comparison of acceleration spectra with or without diaphragm wall

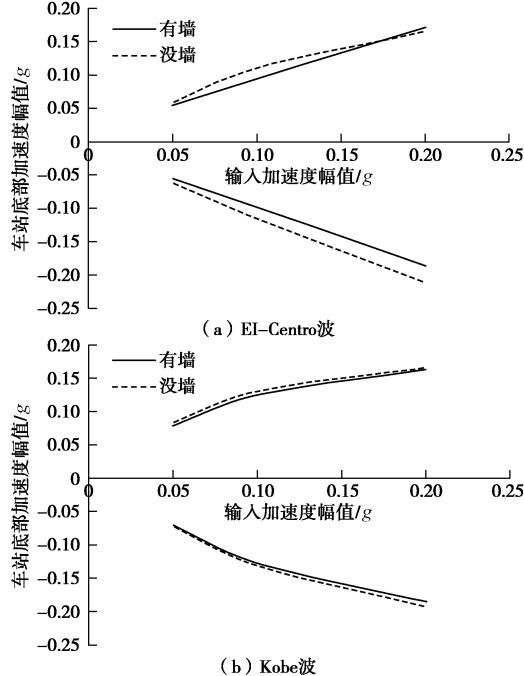


图 7 车站结构底板跨中加速度反应时程幅值

Fig. 7 Amplitudes of acceleration responses under bottom of underground subway station

在对地铁车站主体结构抗震能力起到一定的有利作用。

2.2 地下连续墙对车站主体结构侧向变形的影响

侧向地下连续墙的存在必然加强地铁车站主体结构的抗侧移刚度, 同时也将改变侧向地基土层与车站主体结构的动力相互作用。上述影响应主要体现在对地铁车站主体结构侧向变形的影响上。因此, 图 8 给出了有无地下连续墙时地铁车站主体结构顶底间左右摆动相对位移最大时所对应的结构侧移沿结构高度的变化曲线。由图可知, 当地下连续墙存在时, 车站结构侧移曲线明显接近于直线, 而无地下连续墙时车站主体结构的侧移曲线明显呈反“S”型, 上述变化随结构摆动幅值的变大而越加明显。造成上述变化的主要原因应为地下连续墙与车站主体结构侧墙叠合固接后将对侧墙抗侧移刚度和接点部位的变形起到明显的约束作用, 进而导致板与墙在连接点处结点的变形传递出现了明显的改变, 即连接点处板的弯曲变形明显增大。

总体来看, 当结构右摆相对位移最大时地下连续墙明显减小车站主体结构的最大侧移量, 而当结构左摆时, 地下连续墙存在时车站主体结构的最大左侧相对位移接近甚至明显超过地下连续墙不存在时对应的最大左侧相对位移, 造成上述现象的机理应与车站结构惯性力和侧向地层与地下结构的相对动刚度比有关, 具体原因还有待进一步深入调查和研究。

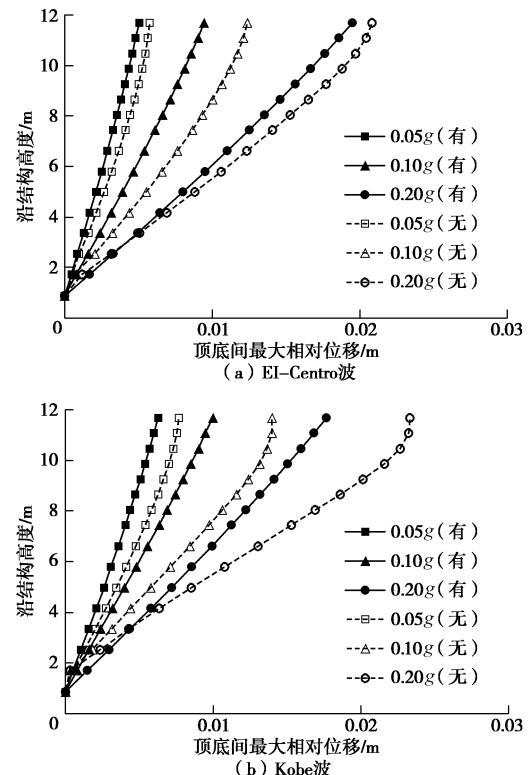


图 8 车站摆动时顶底间最大相对位移

Fig. 8 Curves of relative horizontal displacements along height of subway station

图 9 给出了有无地下连续墙时车站结构的上下层对应的最大层间位移角随输入加速度峰值的变化曲线, 由图可知, 地下连续墙对车站主体结构下层位移角的影响较大, 即有效地减小了下层的层间位移角, 这将对下层结构的水平向抗震性能有很大的提高。且随着输入地震动变强, 上述有利影响越明显。但是, 地下连续墙对上层抗震性能的提高明显不如对下层结构的影响, 尤其是基岩输入 El-Centro 波时, 小震时(输入加速度峰值 $0.05g$)甚至出现有墙时上层结构的层间位移角大于无墙时对应的值。

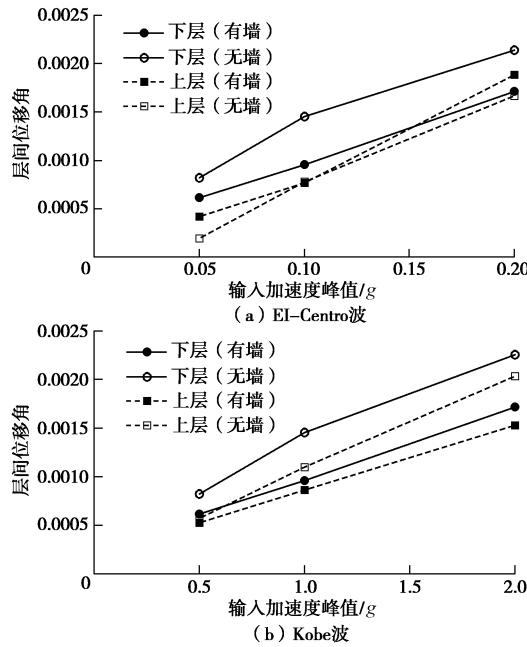


图 9 车站结构的最大层间位移角

Fig. 9 Maximum interlayer displacement angles of the subway station

2.3 地下连续墙对车站顶底面上摩擦剪力的影响

从理论上讲, 地下连续墙对车站结构顶部和底部土体的约束作用将会改变车站结构顶底面与土体间的动力接触相互作用。根据车站结构顶底面上的摩擦剪力反应特征, 图 10, 11 给出了大震时($0.2g$)车站结构顶底接触面中间位置具有代表性的中间点的接触面摩擦剪力反应时程。由图可知, 地下连续墙存在时车站结构顶板处土与结构接触面上的相对摩擦反应明显大于没有地下连续墙时对应点的反应。但是, 在车站结构底部土与结构接触面上的相对摩擦反应较不考虑地下连续墙时有减弱的现象。

从理论上讲, 地下连续墙的存在对土体与车站结构之间的相对滑动起到一定的约束作用, 因此土体与车站结构顶底部接触面上的相对摩擦反应都应有减弱的趋势, 这一观点可以用来解释为什么考虑地下连续墙存在时车站结构底部接触面上相对摩擦反应减弱的现象。但是, 由于车站结构上覆土体与侧向地基被地下连续墙完全隔开, 再加上由于高出车站结构顶部的

那部分地下连续墙的侧向变形(受下部车站结构的侧向变形的传递)强加于中间土体上, 使得上覆土体与结构的接触面动力学行为发生了本质的变化, 它们之间很难发生大的相对位移, 从而导致上部土体的惯性力作用在地下结构顶部的增强现象。

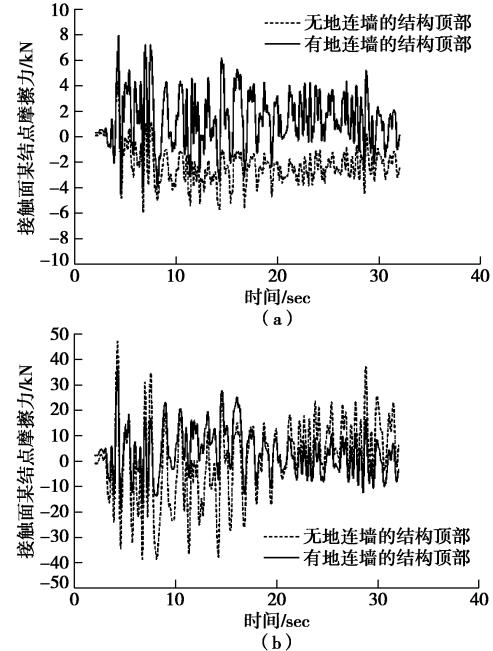


图 10 基岩输入 $0.2g$ 的 El-Centro 波时车站结构顶底部接触面上中间点的摩擦剪力时程

Fig. 10 Time histories of fraction shear forces at top and bottom surfaces of underground structures with El-Centro wave (PGA=0.2g)

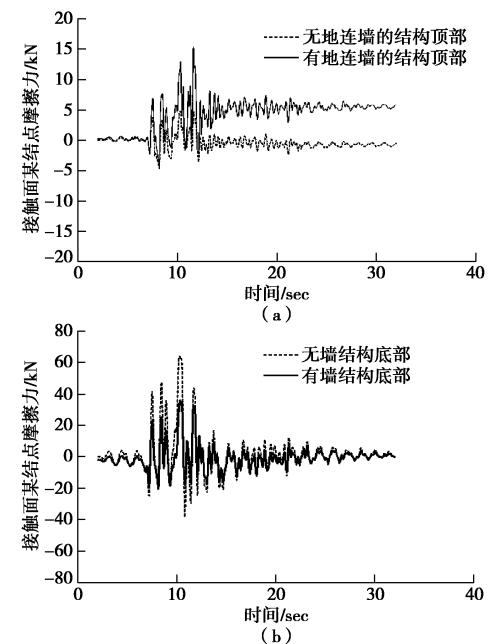


图 11 基岩输入 $0.2g$ 的 Kobe 波时车站结构顶底部接触面上中间点的摩擦剪力时程

Fig. 11 Time histories of fraction shear forces at top and bottom surfaces of underground structures with Kobe wave (PGA=0.2g)

2.4 地下连续墙对车站结构地震破坏模式的影响

为了进一步研究分析地下连续墙对地铁车站结构局部构件抗震性能的影响, 图 12 给出了有无地下连续墙时车站主体结构的受拉地震损伤云图 (DAMAGET 接近于 1 时代表混凝土发生完全受拉开裂破坏)。由图可知, 总体上地下连续墙的存在对地铁车站主体结构侧墙和中柱的地震受拉损伤起到很好的减轻作用。对于车站结构的顶、中和底板的地震受拉损伤而言, 小震时 (输入加速度峰值为 0.1g) 地下连续墙的存在对板与侧墙和中柱的连接部位处板端的受拉损伤还是有利的。但是, 随着输入地震动变强, 地下连续墙对车站主体结构板端的地震损伤有利作用消失, 尤其是在大震时 (输入加速度峰值为 0.2g) 地下连续墙的存在使得车站结构顶板和底板靠近侧墙的两端下部的地震受拉损伤反而比无墙时更为严重。同时, 车站结构中板中间跨两端的地震受拉损伤也更为严重, 当考虑地下连续墙存在时上述板端的地震受拉损伤基本都贯穿结构构件的整个横截面, 表明这些位置都发生了严重的地震受拉破坏。造成上述现象的主要原因仍应为地下连续墙的存在对车站结构侧墙变形的约束作用造成的, 即地下连续墙大大增加了车站主体结构侧墙端部的抗弯刚度, 进而导致车站主体结构侧向变形时顶板和底板端部的弯曲变形无法通过接点传递到侧墙上来减轻自己的受弯变形, 进而加重车站结构板端的地震损伤。

上述计算结果表明, 已有的把不考虑地下连续墙存在看作是地铁地下结构抗震设计的安全储备理念并不合理, 尤其是对强地震作用下地铁地下结构的抗震分析中更应考虑地下连续墙对车站结构地震反应的影响, 加强地铁地下结构板端的抗震性能, 提高地铁车站主体结构的整体抗震性能。

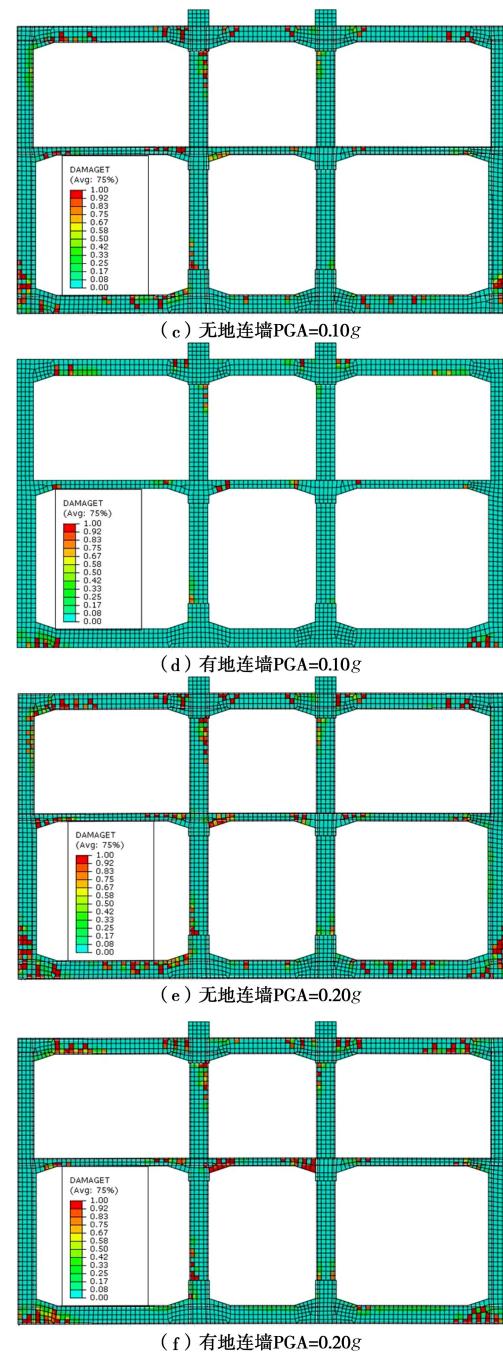
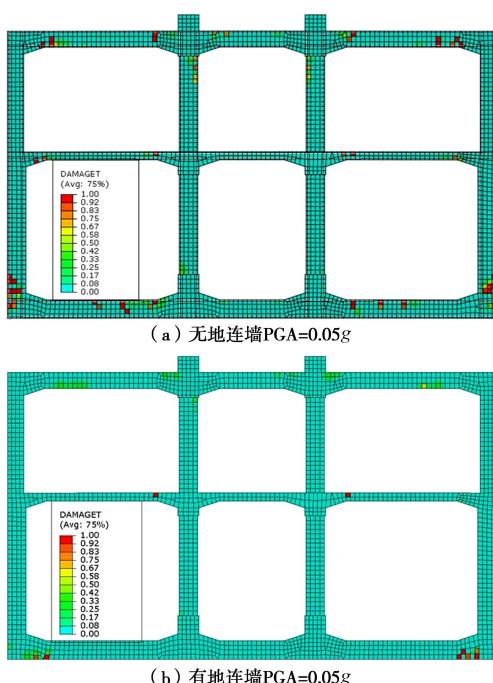


图 12 有无地下连续墙时车站结构地震受拉损伤对比
(El-Centro 波)

Fig. 12 Comparison of earthquake tension damages with or without diaphragm wall

图 13 给出了地下连续墙自身的地震受拉损伤云图, 可以发现车站主体结构底板标高以上的地下连续墙基本没有受到地震受拉损伤。但是, 车站结构底板处地下连续墙的地震受损尤为严重, 且完全受拉破坏贯穿整个横截面。同时, 该截面以下地下连续墙的地震受拉损伤也较为明显。造成车站结构底板附件地下连续墙严重地震损伤破坏的主要原因应为: 地铁车站结构的存在使得该处上下地层的刚度将发生明显的突变, 进而导致该处地下连续墙将会发生明显的动应力

集中现象, 以致该处的地下连续墙发生较为严重的地震受拉损伤。这一计算结果提醒我们, 当进行该类地铁地下车站结构抗浮验算中如果考虑了地下连续墙的抗浮作用时, 地震中地下连续墙下端的严重地震受拉破坏将会导致其抗拔性能大大降低, 甚至完全丧失(车站结构底部地下连续墙断裂时), 这将导致地震中由于地基土体孔隙水压力上升而造成地的铁车站结构更易发生上浮震害, 这一现象应在该类地铁车站结构的上浮验算中进行必要的考虑。

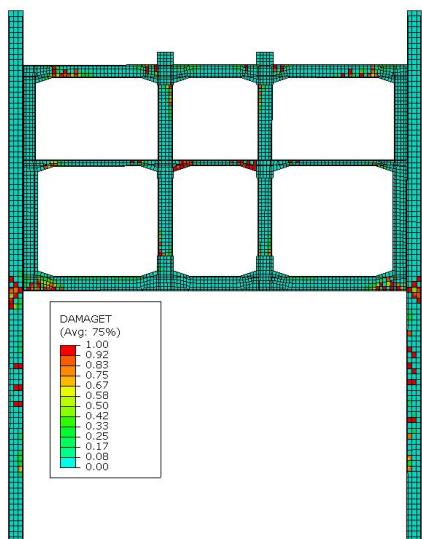


图 13 地下连续墙的地震受拉损伤分布特征 (El-Centro 波)
Fig. 13 Distribution of earthquake tension damages of diaphragm wall

3 结 论

针对现有地铁地下结构抗震分析中不考虑侧向地下连续墙的实际情况, 本文通过建立土-地下连续墙-地铁地下车站结构动力相互作用体系地震反应的有限元数值分析模型, 分析了地铁地下车站侧向地下连续墙对主体结构地震反应的主要影响规律, 得到的主要结论和新发现如下:

(1) 从车站主体结构底部加速度反应和顶底间侧向相对变形的幅值上看, 地铁车站侧向地下连续墙明显对其抗震起到明显的有利作用, 即明显减小车站结构底部的加速度反应和车站结构顶底的最大侧向变形, 将对水平向地震作用下地下车站结构侧墙和中柱的抗震性能起到明显的提高作用。

(2) 但是, 地下连续墙与车站结构侧墙的叠合作用使得车站结构侧墙抗侧移刚度大大提高的同时, 导致地下结构顶底板和侧墙的连接处板端的动力变形的承担大小发生明显的变化, 使得大震中车站主体结构顶底板与侧墙的连接部位板端的地震拉伸损伤破坏明显比不考虑地下连续墙时更为严重, 以及中板中跨两

端的地震损伤破坏也被明显加重, 在该些连接部位的板端可通过增加箍筋密度和加腋处理来提高其抗震性能。

(3) 由于车站主体结构的存在将导致车站结构底板标高处土层的侧向变形刚度突变, 导致该处的地下连续墙更易发生应力集中, 从而导致该位置地下连续墙的地震受拉破坏明显, 下部地下连续墙的地震损伤也较为明显, 这将可能造成地铁车站结构在强震中的上浮量增大。

(4) 地下连续墙的存在也明显改变车站结构顶底板与土体接触面上的摩擦剪力反应, 总体上车站结构底面与土体间的相对摩擦剪力反应减弱, 车站结构底面与土体间的相对摩擦剪力反而增强, 具体原因还有待进一步的研究。

(5) 通过本文的研究表明, 在地铁地下结构抗震设计中不考虑地下连续墙存在时不能简单看成是对地铁地下结构抗震的安全储备。但是, 由于地下连续墙存在时土与地下结构的相互作用的复杂性, 还需进一步对该问题进行系统的研究, 最终对现有的地下结构抗震设计分析方法进行必要的修正。

参 考 文 献:

- [1] IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu earthquake[C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2000: 1043.
- [2] HASHASH Y, HOOK J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, **16**(4): 247 – 293.
- [3] ZHUANG H Y, CHENG S G, CHEN G X. Numerical emulation and analysis on the earthquake damages of Dakai subway station caused by the Kobe earthquake[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 245 – 250.
- [4] 川岛一彦. 地下结构の耐震设计[M]. 日本: 鹿島出版社, 1994. (KAWASHIMA K. Seismic design of underground structures[M]. Japan: Kashima Publishing Company, 1994. (in Japanese))
- [5] KAWASHIMA K. Seismic design of underground structures in soft ground, a review[C]// Proceedings of the International Symposium on Tunneling in Difficult Ground Conditions. Tokyo, 1999.
- [6] 杨林德, 王国波, 郑永来, 等. 地铁车站接头结构振动台模型实验及地震响应的三维数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1892 – 1898. (YANG Lin-de, WANG Guo-bo, ZHENG Yong-lai, et al. Shaking table tests on subway station

- joint structure and 3D numerical simulation of seismic response[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1892 – 1898. (in Chinese))
- [7] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 复杂断面地下结构地震反应分析的整体式反应位移法[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(1): 134 – 142. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral response deformation method in seismic analysis of complex section underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(1): 134 – 142. (in Chinese))
- [8] 王刚, 张建民, 魏星. 可液化土层中地下车站的地震反应分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1623 – 1627. (WANG Gang, ZHANG Jian-min, WEI Xing. Seismic response analysis of a subway station in liquefiable soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1623 – 1627. (in Chinese))
- [9] ZHUANG H Y, HUZ H, WANGX 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] 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.
- [11] 马学宁, 赵双喜, 艾昕. 地下连续墙深基坑支护结构振动台模型试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, **34**(1): 1 – 5. (MA Xue-ning, ZHAO Shuang-xi, AI xin. Shaking table test study on deep pit supporting structure of underground continuous wall[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, **34**(1): 1 – 5. (in Chinese))
- [12] LIU H B, SONG E X. Working mechanism of cutoff walls in reducing uplift of large underground structures induced by soil liquefaction[J]. Computers and Geotechnics, 2006(33): 209 – 211.
- [13] ZHUANG H Y, CHEN G X. A viscous-plastic model for soft soil under cyclic loadings[C]// Geotechnical Special Publication of ASCE, Soil and Rock Behavior and Modeling- Proceedings of the Geo-Shanghai Conference, 2006, **150**: 343 – 350.
- [14] LEE Jeeho, FENVES Gregory L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998(4): 892 – 900.
- [15] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, **25**(3): 299 – 326.
- [16] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(2): 30 – 36. (LOU Meng-lin, WANG Wen-jian, ZHU Tong. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2000, **20**(2): 30 – 36. (in Chinese))
- [17] BS 5975:2008 + A1 2011 Code of practice for temporary works procedures and the permissible stress design of falsework.
- [18] 庄海洋, 吴祥祖, 陈国兴. 考虑初始静应力状态的土-地下结构非线性静、动力耦合作用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊1): 3112 – 3119. (ZHUANG Hai-yang, WU Xiang-zu, CHEN Guo-xing. Study of nonlinear static and dynamic coupling interaction of soil-underground structure considering initial static stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 3112 – 3119. (in Chinese))
- [19] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学(E辑): 工程科学材料科学, 2005, **35**(9): 966 – 980. (LIU Jing-bo, LI Bin. A three-dimensional visco-elastic uniform artificial boundary for static and dynamic together[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2005, **35**(9): 966 – 980. (in Chinese))