

DOI: 10.11779/CJGE201907007

土-地下连续墙-复杂异跨地铁车站结构 动力相互作用分析

王建宁^{1, 2}, 窦远明¹, 庄海洋^{*2}, 付继赛², 马国伟¹

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 针对目前地铁地下车站结构抗震性能研究中不考虑地下连续墙存在的现实问题, 通过建立土-地下连续墙-复杂异跨地铁车站结构静动耦合非线性相互作用的有限元数值模型, 对比分析了无地下连续墙、含单层地下连续墙及含双层地下连续墙等不同情况下异跨地铁地下车站结构的地震动力反应特征。结果表明: 地下连续墙的存在仅在地震强度较小时能够显著提高车站主体结构的抗水平侧移能力, 当地震强度较大时结构的水平位移增大明显; 从结构层间位移的角度看, 结构下层的层间位移涨幅最大, 不考虑地下连续墙存在的计算结果将偏于危险; 地下连续墙加强了地铁车站结构的抗侧移刚度, 致使车站结构整体变形形态和内力分布发生重大变化, 其中结构侧墙端部应力水平明显减小, 各楼板端部的应力水平明显增大; 本文计算工况中, 异跨车站结构的下层中柱是抗震设计时的薄弱位置, 其中以双层地下连续墙工况时的结构下层最为危险。

关键词: 异跨地铁地下车站; 地下连续墙; 土-结构相互作用; 抗震性能

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)07-1235-09

作者简介: 王建宁(1992—), 男, 博士研究生, 从事地铁地下结构抗震研究工作。E-mail: wangjianninghebut@163.com。

Seismic responses of dynamic interaction system of soil-diaphragm wall-complicated unequal-span subway station

WANG Jian-ning^{1, 2}, DOU Yuan-ming¹, ZHUANG Hai-yang², FU Ji-sai², MA Guo-wei¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Institute of Geotechnical
Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In view of the current practical problems of neglecting the existence of underground diaphragm walls in the study of seismic performance for underground subway structures, a static and dynamic coupling finite-element model for the interaction system of soil-diaphragm wall-complicated unequal-span subway station is established, and the earthquake responses among the unequal-span subway station without diaphragm wall as well as structures with single- and double-layer diaphragm walls are compared and analyzed. The results show that the existence of diaphragm walls can significantly improve the resistance of the station to horizontal lateral displacement in small earthquakes, while the horizontal displacement of the subway structures increases obviously when the seismic intensity increases. Moreover, the interlayer displacement of the lower structures increases the most, which implies that the calculated results of ignoring the existence of underground diaphragm walls will be skewed to danger. The diaphragm walls strengthen the anti-lateral stiffness of the subway station, which leads to a significant change in the overall deformation state and internal force distribution of the underground structures, among which the stress level at the end of the side wall of the structures is dramatically reduced and the stress level at the end of each floor is increased significantly. The lower columns of unequal-span subway station act as the weak position in the structural seismic design under strong earthquakes, especially for the case of double-layer diaphragm walls.

Key words: unequal-span underground subway station; diaphragm wall; soil-structure interaction; seismic performance

0 引言

1995 年日本阪神地区发生里氏 7.2 级地震, 大规模的地铁车站、区间隧道、综合管廊、埋地管线等地下构筑物遭到破坏, 其中大开地铁车站的塌毁是世界

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778290, 51778282); 江苏省高校自然科学基金重大项目(16KJA560001); 河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2018038)

收稿日期: 2018-08-29

*通讯作者 (E-mail: zhuang7802@163.com)

地震工程史上出现的首例地下结构完全倒塌破坏的记录，此后地下结构的抗震研究工作受到了世界各国学者的广泛关注并取得了较大发展^[1]。然而，到目前为止绝大多数的地铁地下结构都还没有经受过地震的严峻考验，这些地下结构随时面临着地震的威胁^[2]。

近年来，随着城市化进程的不断推进和轨道交通系统的快速发展，合理开发利用地下资源、加强地下交通网络与其他建筑之间的联系已成为地下空间规划布局的重要方向之一。与此同时，具有特殊断面形式的地铁车站、商业步行街等地下结构日益增多，其中在车站结构截面形式不断变化过程中，上宽、下窄型异跨地铁车站结构已逐渐成为城市地下大空间开发时地铁车站结构的常用形式，大型复杂异跨车站结构的出现对地铁地下结构整体的抗震安全性能提出了更高的要求。目前，关于大型地铁地下结构抗震性能方面的研究工作多集中于传统矩形框架式地铁车站，而针对复杂截面构造地铁地下车站地震动力响应的研究开展较少。不同学者^[3-6]分别以不同结构形式的多层多跨地铁车站结构为研究对象，通过不同分析手段揭示了复杂场地土-大型地下车站结构动力相互作用地震反应规律和灾变机理。然而，上述研究中的地铁车站结构只是在结构内部构造上存在不同，其外部轮廓均为简单的规则矩形，对于受周围地层变形约束作用为主的地下结构而言，外部轮廓的变化将明显影响结构整体的抗震性能和地震动力响应特征。目前，以上宽下窄型异跨车站结构为主体的研究工作开展十分有限，相关研究成果还不足以指导日益更新的地铁地下车站结构抗震设计。路德春等^[7]、陈苏等^[8]和庄海洋等^[9]曾对此类地铁车站的地震反应进行过初步探讨，研究成果对提高该类地铁车站结构抗震性能的认识及抗震设计水平提供了合理的参考。然而，现有研究把不考虑地下连续墙存在看作是地铁地下结构抗震设计时的安全储备的观念忽略了墙体对地下结构的不利作用。施作地下连续墙是地铁工程建设中的常见工序，工程完工后一般将作为永久构件置于车站结构的两侧^[10]。地下连续墙作为影响结构整体变形性态和受力分布的要素之一，其存在必将对复杂异跨车站结构的地震反应和抗震设计产生重要影响，尤其是在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的现实存在问题。因此，有必要结合此类异跨车站结构的实际施工形式对其影响规律进行专门研究。

鉴于此,本文以新型复杂异跨地铁地下车站结构为主体,针对现有抗震性能研究中不考虑地下连续墙现实存在的问题,通过建立土-地下连续墙-复杂异跨地铁车站结构静动耦合非线性相互作用的有限元数

值模型, 对比分析了无地下连续墙、含单层地下连续墙及含双层地下连续墙等不同情况时异跨地铁地下车站结构的侧向位移反应、加速度反应和地震损伤破坏分布特征等规律, 并给出了一些有价值的研究结论和新发现。

1 计算模型及方法

1.1 有限元分析模型

本文以苏州地铁一号线某异跨车站结构为工程背景,其主体部分的横断面尺寸如图1所示。该车站属于上层五跨、下层三跨的大型复杂截面地下车站结构,主体结构上层外侧采用SMW工法进行施工,下层外侧为0.8 m厚的叠合式地下连续墙,墙体底部标高为-30 m,墙体顶部与结构变跨节点处的圈梁现浇形成整体。根据该工程的实际情况,结构下层外侧的地下连续墙可作为永久结构存在,结构上层外侧SMW工法的围护体系限于材料强度只能作为临时结构存在,但鉴于该类大型异跨地铁地下车站上层结构的围护体系也有采用地连墙围护形式的可能,因此,为探讨两侧竖向构件对结构地震动力响应的影响,本文根据该工程的实际背景和现有地下车站结构抗震设计不考虑地连墙的现实情况,进而构造了无地下连续墙、含单层地下连续墙及含双层地下连续墙等3种不同的计算工况。

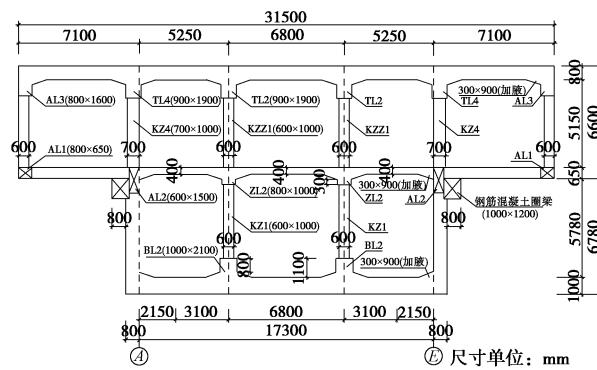


图 1 异跨地铁车站结构横截面尺寸

Fig. 1 Cross-sectional dimension of unequal-span subway station

本文计算所选用的工程场地地质条件土层分布及参数如表 1 所示。土体的非线性本构模型采用庄海洋等^[11-12]建立的软土记忆型黏塑性嵌套面动力本构模型, 该模型是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。混凝土的动力本构模型采用 Lee 等^[13]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^[14]提出的塑性损伤模型基础上进行改进, 分别采用两个

表 1 场地土层分布与参数

Table 1 Distribution and parameters of site

土层编号	土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	剪切波速/(m·s ⁻¹)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	动泊松比
1	素填土	3.00	18.40	8.0	140.0	13.5	16	0.49
2	软黏土	6.60	19.00	10.0	152.7	15.4	26	0.49
3	粉细砂	6.78	20.50	14.5	167.1	7.0	30	0.49
4	黏土	7.62	19.40	15.0	158.5	18.8	16	0.49
5	中砂	10.00	20.90	21.0	172.7	5.0	28	0.49
6	中砂	8.00	21.20	27.8	205.8	5.0	30	0.49
7	粉质黏土	8.00	18.90	33.0	236.3	12.3	28	0.49
8	砂土	15.00	20.50	29.0	263.2	6.2	30	0.49
9	老黏土	15.00	19.30	35.0	491.6	21.0	21	0.49

表 2 混凝土本构模型参数

Table 2 Dynamic plastic-damage model parameters of concrete

材料 参数	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	扩张角 $\psi/(^\circ)$	初始屈服应力 力 σ_{c0}/MPa	极限应力 σ_{cu}/MPa	初始屈服拉应 力 σ_{t0}/MPa	拉伸刚度恢复 系数 ω_t	压缩刚度恢复 系数 ω_c	损伤 因子 d_c, d_t
数值	3.0×10^4	0.18	2500	36.31	13.0	20.1	2.4	0.0	1.0	d_c, d_t

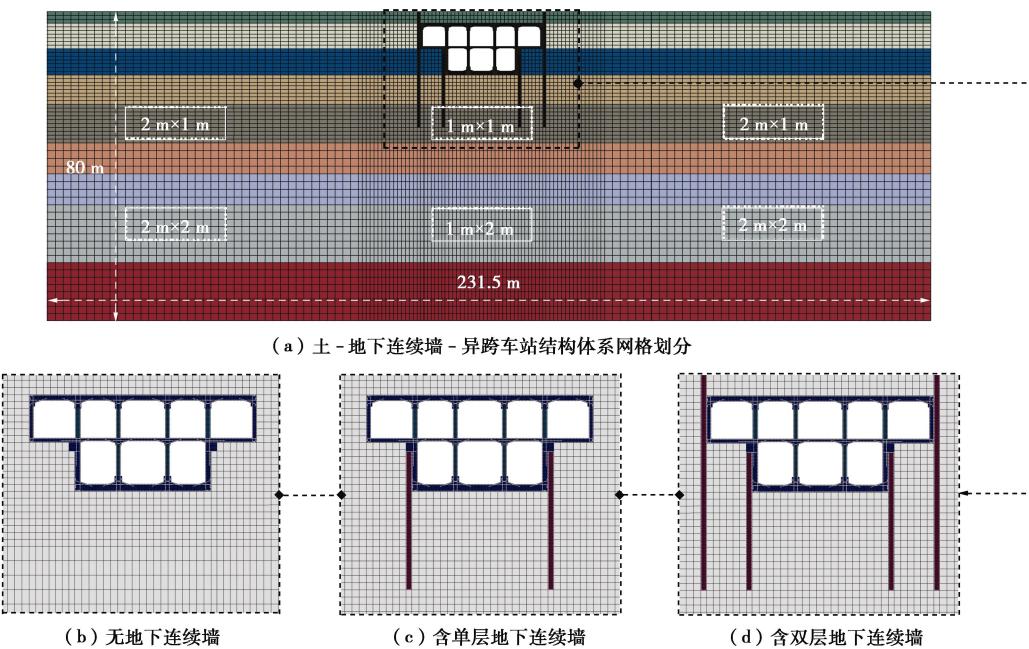


图 2 有限元模型网格划分示意图

Fig. 2 Meshing plan of finite element model

损伤变量来描述混凝土受拉和受压破坏时的刚度衰减规律, 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。地铁车站结构主体及地下连续墙部分的混凝土强度为 C30, 混凝土对应的动力损伤模型参数如表 2 所示^[15-16]。

为了尽量消除截取边界的影响, 本文选取地基计算宽度为 231.5 m, 深度为 80 m, 土体、车站结构及地下连续墙的网格划分如图 2 所示。采用四节点平面应变减缩积分单元对土体、车站结构和地下连续墙进

行离散, 远场土体的网格尺寸分别 $1\text{m} \times 2\text{m}$, $2\text{m} \times 1\text{m}$ 及 $2\text{m} \times 2\text{m}$, 结构周边土体网格进行了加密处理, 其尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$; 通过刚度等效折减的办法考虑二维非线性有限元模型中柱的连续化问题, 等效后的中柱混凝土弹性模量 $E=3.85 \times 10^3 \text{ MPa}$, 混凝土结构中的钢筋采用植入杆单元进行模拟, 不考虑钢筋与混凝土之间的滑移与分离现象。地铁车站结构与地下连续墙之间的连接方式为绑定约束, 土与地下车站结构、土与地下连续墙之间的接触面法向接触均采用“硬”接触, 即认为当土体与地铁车站结构及地下连续墙之

间出现拉力时接触面将立即分离；切向接触服从 Coulomb 摩擦定律，即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

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

式中 τ_{crit} ， P 分别为接触面上的临界剪应力和法向接触力； μ 为接触面上两种材料间的摩擦系数，根据已有研究^[16]，本文取值为 0.4。为实现土-地下连续墙-异跨地铁地下车站结构相互作用的非线性静动耦合模型计算，在静力分析时基岩面采用固定约束而两侧边则限制水平方向上的位移，随后将静荷载下的分析结果用于地应力平衡计算，在施加动荷载前进行边界条件转换，解除场地两侧边的水平约束并限制其竖向位移，基岩面水平方向约束则转换为地震波输入^[17]。此外，为令计算模型更符合实际情况，在静力和动力计算过程中的场地表面均考虑了 20 kPa 的超载。

1.2 输入地震动

本文选取 Kobe 波和 Loma Prieta 波作为基岩输入地震动。Kobe 波为 1995 年日本阪神地震中神户海洋气象台记录的基岩强震加速度记录，其南北向的水平向加速度原始峰值约为 0.85g，强震部分持续时间约为 10 s。Loma Prieta 波选取 1989 年美国加州地震中具有代表性的水平向加速度记录，其原始峰值加速度约为 0.36g，强震部分持续时间约为 6 s。在输入地震动时，将基岩面输入地震动峰值加速度（PBA）分别调整为 1.0, 2.0, 3.0 m/s²，持时均为 40 s。当峰值加速度为 1.0 m/s² 时，各波的加速度时程及反应谱如图 3 所示。

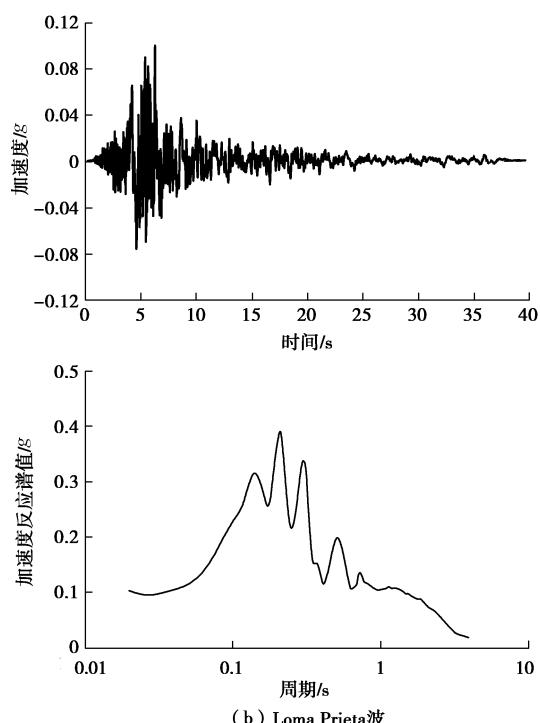
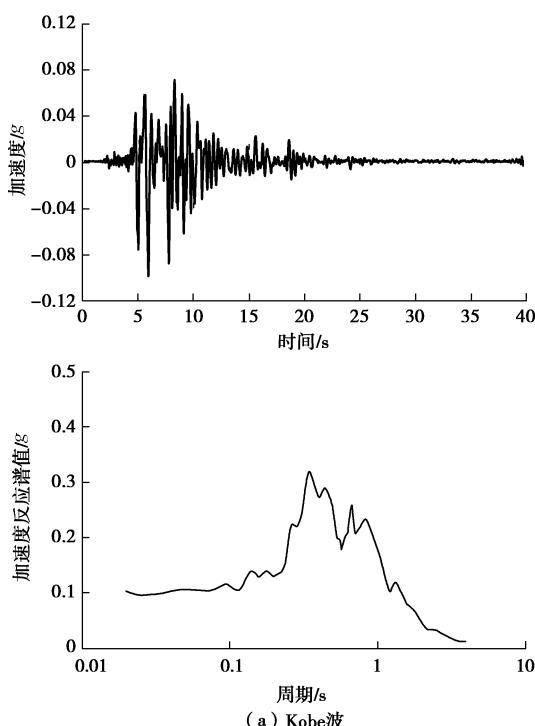


图 3 基岩输入地震动的加速度时程及反应谱

Fig. 3 Acceleration time-histories and response spectrum for the input waves

2 计算结果分析

2.1 地下连续墙对异跨车站结构侧向变形反应的影响

异跨地铁车站结构在外部轮廓上与传统矩形车站结构不同，其侧墙在上下层之间的中板位置处间断呈阶梯状，结构在水平地震荷载作用下的侧向变形规律具有一定的特殊性，而地下连续墙的存在必将对此产生重要影响。因此，图 4 给出了无墙、单墙和双墙等工况下异跨车站结构侧墙水平相对位移左右摆动最大时刻对应的相对位移沿结构高度变化分布曲线，由图 4 可得如下规律：

(1) 无地下连续墙异跨车站结构的侧移曲线具有明显的“波浪型”曲线特征和“阶梯”特征；单层地下连续墙异跨车站结构的侧移曲线上层部分曲线特征较为明显，而下层部分基本呈直线分布；双层地下连续墙异跨车站结构的侧移曲线上层部分和下层部分均呈直线分布，且下层的相对变形明显大于上层，二者的斜率在中板变跨标高附近发生改变。造成上述变化的主要原因应为地下连续墙与异跨车站主体结构侧墙叠合固接部分的抗侧移刚度得到加强，该部位侧墙的抗侧移变形能力将明显增大。

(2) 以 Kobe 波为例，当输入峰值加速度较小时 (PBA=0.10g)，单层地下连续墙车站结构上层的侧移曲线要大于无地下连续墙车站结构和双层地下连续墙

车站结构的侧移曲线, 而下层则正好相反; 当输入峰值加速度进一步增大时 ($PBA=0.20g$), 无地下连续墙车站结构的侧移曲线增长幅度较小且整体上要小于单层和双层地下连续墙车站结构的侧移峰值; 当输入峰值加速度较大时 ($PBA=0.30g$), 3 种工况下的异跨车站结构侧向位移曲线均增大明显, 其中以无地下连续墙工况最为突出。

(3) 整体上看, 从无地连墙到单层地连墙再到双层地连墙的变化过程中, 车站结构下层的相对变形明显持续增大, 而上层的相对变形明显持续减小, 这一发现与传统的两层三跨箱式车站结构侧向变形受地连墙的影响规律明显不同^[17], 甚至与以往关于地下连续墙能够提高地下结构的抗侧移能力并减小结构整体的侧移水平的认识完全相左。上述规律也说明异跨地铁车站结构与地连墙的相互作用极其复杂, 有必要进一步对该相互作用系统进行全面系统的研究, 以便能够建立该类车站结构合理的抗震分析方法。

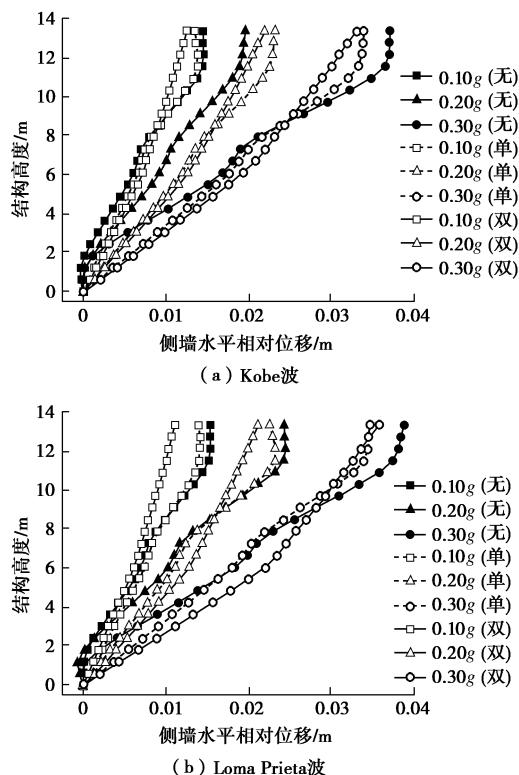


图 4 车站结构侧墙水平摆动幅值曲线

Fig. 4 Horizontal displacements of structural side wall

为进一步分析异跨车站结构的层间变形及整体变形特征, 图 5 给出了 Kobe 波作用下异跨车站结构跨中上层、下层及顶底间的层间位移角, 图 6 给出了 $PBA=0.3g$ 时异跨车站结构上层、下层的相对位移时程曲线。由图 5 可知, 各工况下的层间位移角均随着输入地震动峰值加速度的增大而增大, 其中单层、双层地下连续墙工况中的结构层间位移角变化近似呈线

性增长, 并且上层、下层层间位移角之间的数值差异逐渐变大, 这说明结构上层与下层之间的水平变形差异也越来越大, 该规律在双层地下连续墙工况时最为明显。当输入峰值加速度较小时 ($PBA=0.10g$), 地下连续墙的存在将有效减小结构上层和下层的层间位移角, 这对提高异跨车站结构整体的抗震性能是有利的; 然而, 当输入峰值加速度进一步增大为 $0.20g$ 和 $0.30g$ 时, 车站结构下层的层间位移角随地下连续墙布置的增多而增大明显。

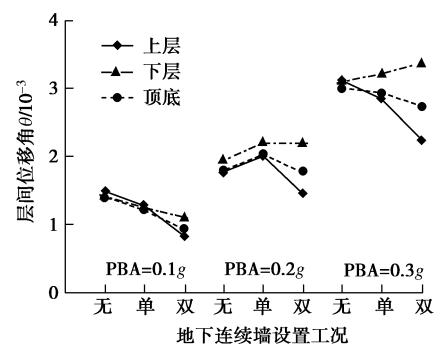


图 5 Kobe 波作用下车站结构的层间位移角

Fig. 5 Interlayer displacement angles of station in Kobe motion

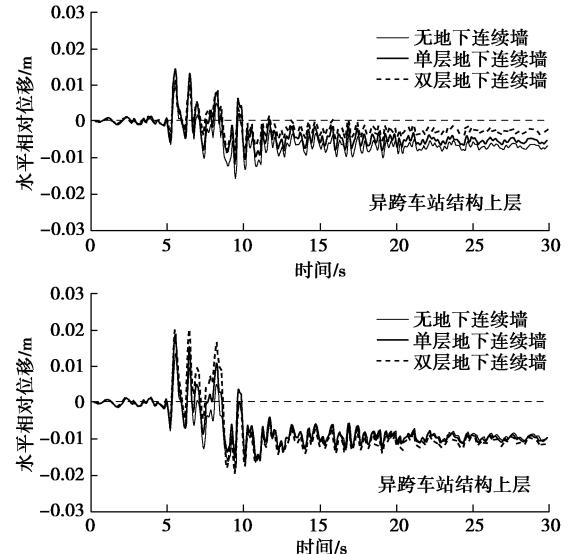


图 6 Kobe 波作用下车站结构的层间位移时程曲线 ($PBA=0.30g$)

Fig. 6 Time-history curves of storey of station in Kobe motion with $PBA=0.30g$

由图 6 可知, 3 种工况下的车站结构在地震结束时均存在一定程度的残余变形, 并且车站结构下层的层间相对位移峰值及残余变形均大于上层, 其中结构上层的层间相对位移峰值及残余变形以无地下连续墙工况时最大、单层地下连续墙工况次之、双层地下连续墙工况最小, 而结构下层的层间位移峰值及残余变形则正好相反。

2.2 地下连续墙对异跨车站结构加速度反应的影响

地下连续墙的存在将对墙体埋深范围内的土体起到约束作用, 单层地下连续墙的约束范围主要为结构底板下方的土体, 而双层地下连续墙的约束范围和效果则进一步增大, 进而地基与结构的地震加速度反应将受到一定的影响。因此, 图 7 给出了无墙、单墙和双墙工况下异跨车站主体结构各楼板处的峰值加速度反应及底板处的加速度反应谱(阻尼比为 0.05)。

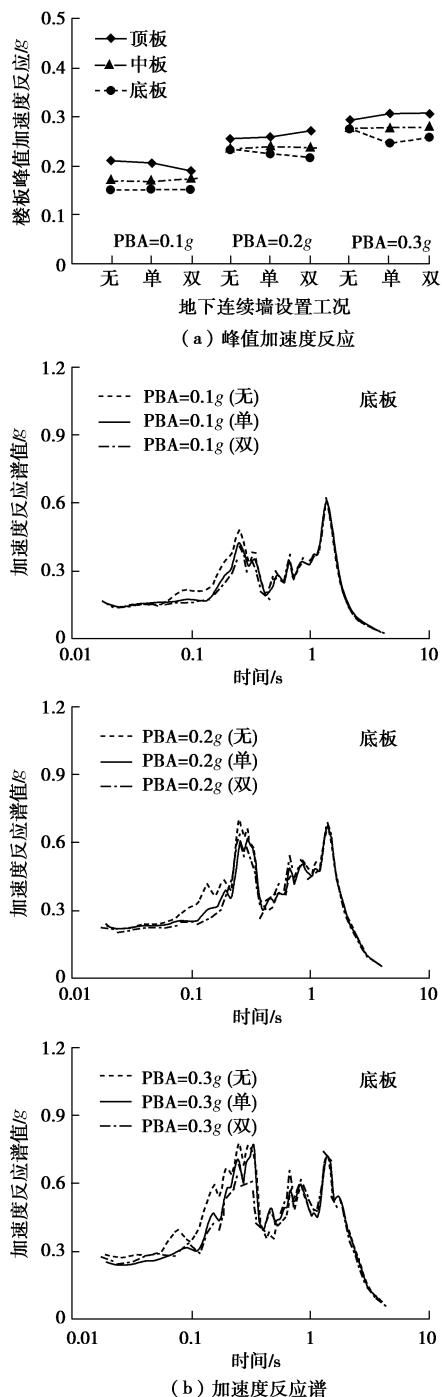


图 7 Kobe 波作用下车站结构楼板的加速度反应

Fig. 7 Acceleration responses of structural slab in Kobe motion

由图 7 (a) 可知, 当地震强度较小时, 地下连续墙的存在主要对异跨车站结构顶板的峰值加速度反应

起到明显的削弱作用; 当输入地震动强度进一步增大时, 地下连续墙的存在将会放大结构顶板的峰值加速度反应, 中板受到的影响不大, 而底板的峰值加速度反应则有一定程度的减小。上述分析表明, 在使用规范建议的反应位移法或反应加速度法时, 有必要考虑地连墙对该类地铁车站结构不同位置的加速度影响。由图 7 (b) 可知, 地下连续墙主要对异跨车站结构底板加速度反应谱短周期范围内(小于 0.4 s)的幅值有较大的削弱作用, 而对周期范围在 0.4~0.8 s 的成分反应具有少许放大作用, 此现象随着输入峰值加速度的增大而越来越明显, 除此之外, 长周期成分(大于 0.8 s)的反应和顶板、中板部分的反应基本不受地下连续墙的影响, 此结果与地下连续墙对传统矩形车站结构的影响规律大致相同^[17]。

2.3 地下连续墙对异跨车站结构地震破坏模式的影响

为研究不同类型地下连续墙对异跨地铁地下车站结构及其局部构件抗震性能的影响, 图 8 给出了无墙、单墙和双墙工况时车站主体结构在不同地震强度下的受拉损伤云图。

由图 8 可知, 不同工况车站主体结构的受拉损伤分布特征具有明显的差异, 其中车站结构各楼板与侧墙的分布特征如下:

(1) 无地下连续墙时车站结构顶板的受拉损伤主要发生在左边跨、右边跨和中跨部分的板端上侧, 悬挑跨基本不受影响, 中板以左、右边跨外端下侧和里端上侧为主, 底板则以中跨上侧受拉损伤最为严重, 边跨两端下侧次之; 上层、下层侧墙的顶部内侧及底部外侧为受拉损伤较大区域, 其中下层侧墙与底板的交接部分最为严重。

(2) 当结构下层外侧设置单层地下连续墙时, 中间三跨顶板部分的受拉损伤降低, 而悬挑跨里端上侧比较突出, 并且在较小地震作用下(PBA=0.10g)便已有贯穿顶板截面的趋势; 中板的受拉损伤分布位置没有发生变化, 但中间三跨部分的损伤水平减小, 悬挑跨部分的损伤程度增大; 底板的跨中部分不再出现明显的受拉损伤, 而在两端下侧的损伤加重, 特别是当输入峰值加速度较大时(PBA=0.30g), 该位置的受拉损伤范围和深度均比较严重; 单层地下连续墙的叠合构造大幅增加了下层侧墙的抗侧刚度, 即使当地震强度较大时该侧墙的上下端部也没有出现明显受拉损伤破坏。

(3) 当设置双层地下连续墙时, 顶板中间跨部分的受拉损伤较单层地下连续墙工况进一步减小, 而悬挑跨顶板与侧墙相交区域下侧出现了明显的受拉损伤, 且该区域破坏程度随着输入峰值加速度的增大而

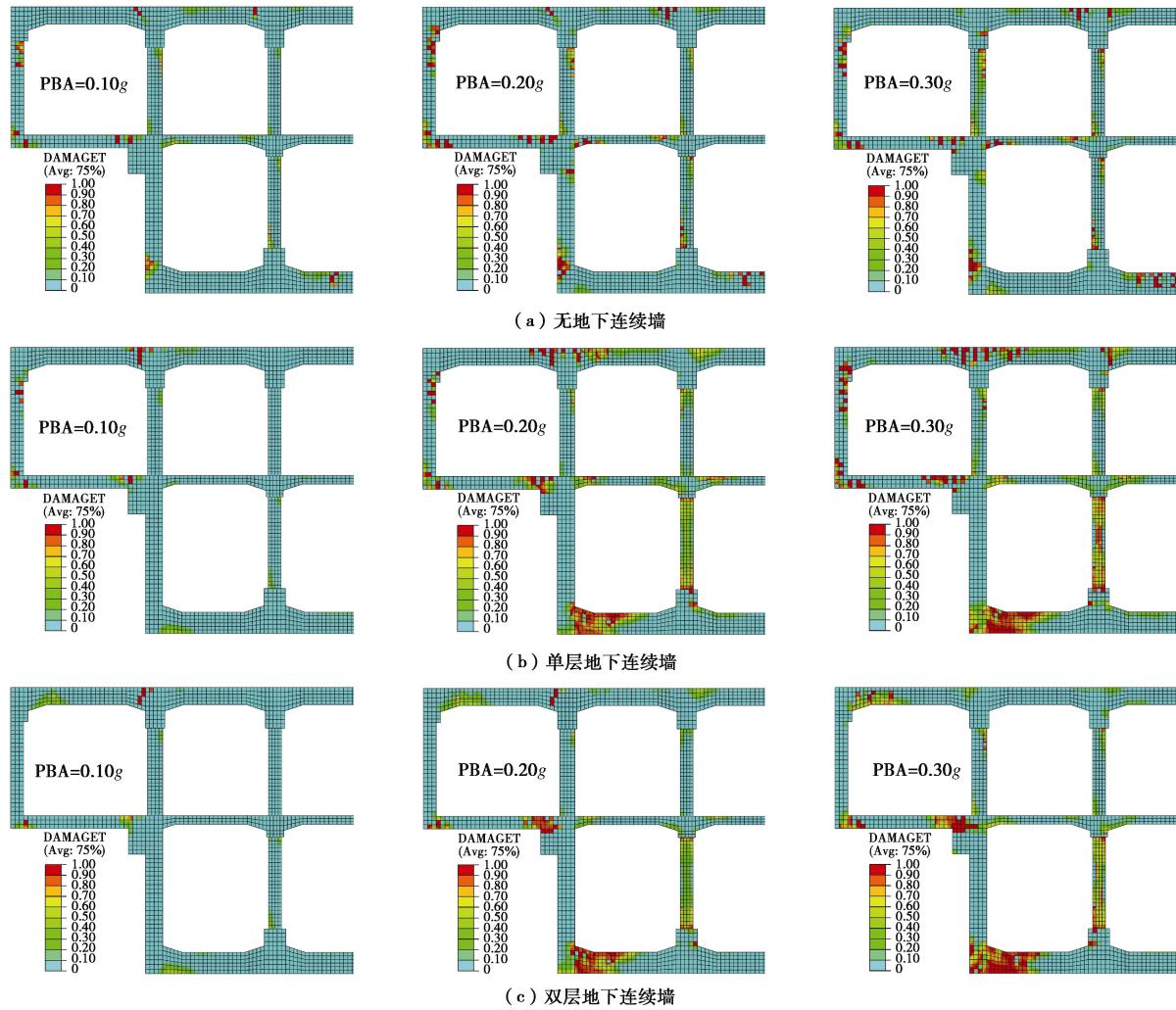


图 8 车站结构受拉损伤云图 (Loma Prieta 波)

Fig. 8 Nephogram of tension damages of subway station in Loma Prieta motion

越发明显, 中板、底板与单墙工况下的受拉损伤分布规律大致相同, 但在相同强度地震作用下底板的损伤破坏更为严重, 在峰值加速度为 $0.3g$ 时, 结构底板端部的贯穿损伤破坏程度和范围进一步扩大, 表明这些位置发生了较为严重的地震破坏; 双层地下连续墙在进一步加强下层侧墙刚度的同时, 也提高了上层侧墙的抗侧刚度, 致使上层侧墙的上下端部不再出现受拉损伤。

对比有、无地下连续墙工况时的计算结果可知, 含单层地下连续墙异跨车站结构的下层侧墙及含双层地下连续墙异跨车站结构的上层、下层侧墙受拉损伤程度均大幅减小, 地下连续墙对异跨车站主体结构侧墙的受拉损伤能够起到很好的减轻效果, 但底板、顶板与侧墙相交区域均出现了较为严重的损伤破坏。当输入峰值加速度较小时, 这些区域的影响并不大, 而当地震强度较大时, 这些构件的局部区域将首先发生破坏, 进而对结构整体的抗震安全性能造成隐患。造成上述现象的原因应为地下连续墙的存在加大了异跨车站主体结构侧墙端部抵抗变形的能力, 进而在地震

荷载作用下节点处发生的弯曲变形主要由楼板承担, 导致了楼板端部的地震破坏更为严重。鉴于异跨车站结构的特殊外形, 不同地下连续墙设置方法对各层中柱和上层边柱受拉损伤分布的影响规律略有区别, 各柱构件端部受拉损伤幅值如图 9 所示。

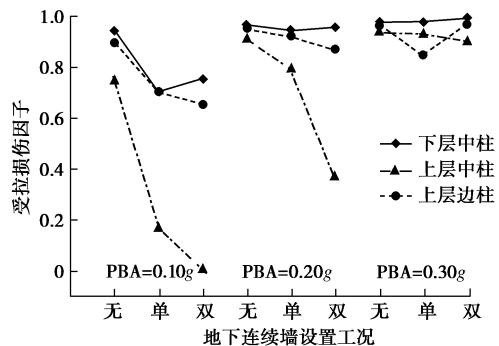


图 9 Loma Prieta 波作用下车站结构中柱受拉损伤

Fig. 9 Tension damages of structural column in Loma Prieta motion

由图 9 可知, 结构下层中柱的受拉损伤破坏程度始终最大, 上层中柱的受拉损伤幅值仅在设置单层地

下连续墙车站结构处于较大地震作用 ($PBA=0.3g$) 时大于上层边柱, 其他工况上层中柱的受拉损伤破坏水平均低于上层边柱, 尤其是当输入峰值加速度较小时此现象更为明显。随着输入地震动强度的增高, 3 种模型中各柱构件的受拉损伤幅值逐渐增大, 但各自之间的差异逐渐减小, 其中以双层地下连续墙车站结构的变化幅度最为明显, 单层地下连续墙车站结构的变化幅度次之, 无地下连续墙结构的变化幅度最小。总之, 当输入峰值加速度较小时 ($PBA=0.10g$), 地下连续墙的存在对结构内部所有柱构件的受拉损伤均起到了减小作用, 其中以上层中柱的减小幅度最为突出, 即地下连续墙对结构中柱的抗震安全是有利的; 当输入峰值加速度较大时 ($PBA=0.30g$), 地下连续墙对各层柱构件已不再具有明显的损伤减幅作用, 双层地下连续墙车站结构的下层中柱和上层边柱破坏程度明显大于无地下连续墙和单层地下连续墙的工况。

3 结 论

本文基于新型复杂异跨地铁地下车站结构型式, 针对现有抗震性能研究中不考虑地下连续墙现实存在的问题及其实际工程的围护结构措施, 通过建立土-地下连续墙-复杂异跨地铁车站结构静动耦合非线性相互作用的有限元数值模型, 对比分析了无地下连续墙、含单层地下连续墙及含双层地下连续墙等不同情况下复杂异跨地铁地下车站结构的地震动力反应特征, 得到以下 4 点结论。

(1) 当地震强度较小时, 地下连续墙的存在能够明显减小异跨车站结构的水平侧移反应和层间位移角, 对提高异跨车站结构整体的抗震性能是有利的; 而当输入地震动强度较大时, 设置地下连续墙工况的异跨车站结构侧移反应要比无地下连续墙异跨车站结构的侧移反应大很多, 车站结构下层的层间位移角随地下连续墙布置的增多而明显增大, 上层与下层的层间位移角差异也越來越明显。

(2) 当地震强度较小时, 地下连续墙的存在主要对异跨车站结构顶板的峰值加速度反应起到明显的削弱作用, 而当输入地震动强度较大时, 地下连续墙的存在将会增大结构顶板的峰值加速度反应, 中板影响不大, 底板的峰值加速度反应则有一定程度的减小, 在相关的抗震简化分析中应考虑地连墙对车站主体结构加速度反应的差异影响。

(3) 地下连续墙对异跨车站主体结构侧墙的地震受拉损伤能够起到很好的减轻效果, 但其对车站结构侧墙端部变形约束作用的大幅增强将导致地震荷载作用下节点处发生的弯曲变形主要由连接处楼板端部承

担, 底板和顶板与侧墙相交区域损伤破坏程度增大, 对结构整体的抗震安全性能造成隐患。

(4) “地下连续墙可以作为提高地下结构抗侧刚度构件”的基本原理是正确的, 但将此概念等同于“可将地下连续墙视为地下结构抗震设计时的安全储备”存在不妥。地下连续墙的存在将明显改变地下结构在地震中的变形形态和破坏模式, 进而对结构内部构件的应力分布和整体的破坏过程产生了诸多影响, 且其影响结果和影响程度要远比传统矩形车站结构复杂的多。因此, 有必要对该问题进行全面系统的研究, 进而明确此类车站结构形式的抗震设计方法和地震安全评价水平划分标准。

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 Xiu-li, LI Yang, XU Cheng-shun, 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. (in Chinese))
- [2] 刘晶波, 李 彬. 地铁地下结构抗震分析及设计中的几个关键问题[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(6): 106 - 110. (LIU Jing-bo, LI Bin. Issues on the seismic analysis and design of subway structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, **39**(6): 106 - 110. (in Chinese))
- [3] 陶连金, 刘春晓, 边 金, 等. 大跨度 Y 形柱地铁车站结构地震反应研究[J]. 力学学报, 2017, **49**(1): 55 - 64. (TAO Lian-jin, LIU Chun-xiao, BIAN Jin, et al. Seismic response of subway station with large span and Y shaped column[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, **49**(1): 55 - 64. (in Chinese))
- [4] 唐小微, 付培帅, 李 宏, 等. 双层预应力大跨度地铁车站结构震害模拟与分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, **36**(6): 892 - 896. (TANG Xiao-wei, FU Pei-shuai, LI Hong, et al. Seismic simulation and analysis of the two-layer prestressed long-span subway station[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2015, **36**(6): 892 - 896. (in Chinese))
- [5] CHEN G X, CHEN S, ZUO X, et al. Shaking-table tests and numerical simulations on a subway structure in soft soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, **76**: 13 - 28.
- [6] CHEN Z Y, CHEN W, LI Y Y, et al. Shaking table test of a multi-story subway station under pulse-like ground

- motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **82**: 111 - 122.
- [7] 路德春, 李云, 马超, 等. 斜入射地震作用下地铁车站结构抗震性能分析[J]. *北京工业大学学报*, 2016, **42**(1): 87 - 94. (LU De-chun, LI Yun, MA Chao, et al. Analysis of the three-dimensional seismic performance of underground[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, **42**(1): 87 - 94. (in Chinese))
- [8] 陈苏, 唐柏赞, 刘爱文, 等. 变截面地铁地下车站三维地震反应特性数值模拟[J]. *地震地磁观测与研究*, 2016, **37**(5): 41 - 48. (CHEN Su, TANG Bai-zan, LIU Ai-wen, et al. 3-D numerical simulation on seismic behavior of variable cross-section subway station structure in complex geological ground[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2016, **37**(5): 41 - 48. (in Chinese))
- [9] 庄海洋, 龙慧, 陈国兴. 复杂大型地铁地下车站结构非线性地震反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, **33**(2): 192 - 199. (ZHUANG Hai-yang, LONG Hui, CHEN Guo-xing. Analysis of the nonlinear earthquake responses of a large complicated subway underground station[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, **33**(2): 192 - 199. (in Chinese))
- [10] 孙长军, 张顶立, 刘井学, 等. 北京地铁车站地连墙支护结构受力变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(增刊1): 78 - 83. (SUN Chang-jun, ZHANG Ding-li, LIU Jing-xue, et al. Mechanical and deformation characteristics of diaphragm wall system of Beijing metro station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(S1): 78 - 83. (in Chinese))
- [11] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华. 土体动力黏塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(10): 1267 - 1272. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(10): 1267 - 1272. (in Chinese))
- [12] 庄海洋, 陈国兴. 对土体动力黏塑性记忆型嵌套面模型的改进[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(1): 118 - 122. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing. Improvement of dynamic viscoplastic memorial nested yield surface model of soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(1): 118 - 122. (in Chinese))
- [13] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(8): 892 - 900.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 庄海洋, 王雪剑, 王瑞, 等. 土-地铁动力相互作用体系侧向变形特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(10): 1761 - 1769. (ZHUANG Hai-yang, WANG Xue-jian, WANG Rui, et al. Characteristics of lateral deformation of soil-subway dynamic interaction system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(10): 1761 - 1769. (in Chinese))
- [17] 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 Xue-jian, ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, 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. (in Chinese))