

DOI: 10.11779/CJGE2022S2007

震后地下结构在火灾下的力学性能初步分析

王国波¹, 刘 强¹, 王鸿杰¹, 王建宁², 董正方^{*3}

(1 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 2 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080; 3 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘 要: 地下结构等地下结构作为城市地下基础设施的重要组成部分, 一旦遭受地震以及地震次生火灾会造成极大的经济损失和人员伤亡, 因此地下结构在地震以及地震火灾作用下的灾变行为亟待研究。基于某三跨两层车站建立其二维分析模型, 首先对其进行了地震模拟, 然后使用重启动分析, 运用热-力耦合方法探讨了地下结构在地震次生火灾作用下响应。从地下结构中柱形变、层间位移等方面分析车站结构在地震及其次生火灾作用下灾变行为, 讨论地震对地下结构抗火性能的影响, 为地下结构受到地震以及次生火灾的性能评价提供参考。

关键词: 地下结构; 地震; 地震次生火灾; 性能评价

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0030-06

作者简介: 王国波(1979—), 男, 湖北孝昌人, 博士, 教授, 从事工程结构抗震研究。E-mail: wgb16790604@126.com。

Preliminary analysis of mechanical properties of subway station under fire after earthquake

WANG Guo-bo¹, LIU Qiang¹, WANG Hong-jie¹, WANG Jian-ning², DONG Zheng-fang³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. China National Machinery Industry Co., Ltd., Beijing 100080, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng, China)

Abstract: As an important part of the urban underground infrastructure, the underground structures such as subway stations will cause great economic damage and casualties once they are subjected to earthquakes and earthquake-induced fires. Therefore, the catastrophic behaviors of the subway stations under the coupling of earthquakes and earthquake-induced fires needs to be studied. A two-dimensional analysis model is established based on a three-span two-story subway station. Firstly, the seismic simulation is carried out, and then the restart analysis is used to discuss the response of the subway station under the action of earthquake and the secondary fire by using the thermal-mechanical coupling method. The catastrophic behaviors of the subway station structure under earthquake and the secondary fire is analyzed from the aspects of column deformation and inter-layer displacement. The influences of earthquake on the fire resistance of the underground structures are discussed, which provides a reference for the performance evaluation of the underground structures under earthquakes and the secondary fire.

Key words: subway station; earthquake; post-earthquake fire; performance evaluation

0 引 言

受 1995 年日本阪神大地震中大开地下结构遭到严重破坏的冲击, 地下结构的抗震问题引起了广泛关注^[1-4]。地下结构在地震时遭受严重破坏的同时, 也会导致电线断开等造成火灾等次生灾害。地下结构发生火灾时会造成巨大的破坏, 因为其具有空间封闭、蔓延快、灭火难的特点, 会造成大量人员伤亡, 如 2003 年韩国大邱发生的地铁纵火事件造成 198 人死亡, 146 人受伤。

在国内外破坏性地震造成的次生火灾报道中, 美国、日本等国家因为多以木造房屋作为民宅形式, 极易受到地震次生火灾影响。如 1906 年美国旧金山 8.3 级地震中, 80% 的人员伤亡和建筑物损毁源自震后持

续 3 d 的火灾^[5]; 1923 年日本东京 7.9 级地震造成了 14 万人丧生, 约 45 万间房屋毁坏, 其中由次生火灾造成的损失约占总损失的 77%^[6]。通过大量的地上结构震害的报道和学者们的研究表明, 地震次生火灾会加剧建筑结构的破坏, 甚至导致建筑结构的倒塌^[7], 给人民群众带来财产和经济损失。

国内外对于地震次生火灾的研究多针对地表结构, Bursi 等^[8]和 Wen 等^[9]分别评估了几何损伤和地震荷载结束时, 剥落对钢-混凝土组合梁柱节点、混凝土柱对地震次生火灾的抵抗能力; Arablouei 等^[10]通过数

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078386, 51878529)

收稿日期: 2022-12-01

*通信作者 (E-mail: dzf@henu.edu.cn)

值模拟研究了地震期间防火层对结构构件防火性能的影响, 发现在柱附近的梁中形成的铰链区域会导致严重的防火层分层现象; 苗吉军等^[11]研究震后火灾环境下混凝土结构的反应, 认为框架结构的高温变形恢复能力变差, 梁截面承载力下降幅度比柱截面大。对于地下结构, 李文婷等^[12]通过数值模拟, 研究了地下结构结构在地震及次生火灾中的变形、损伤及内力变化, 讨论了地下结构地震损伤对车站抗火性的影响; 陈阳等^[13]研究了火灾后 CFRP 材料加固下地下结构结构的抗震性能, 发现 CFRP 加固材料可有效提升结构的刚度, 降低侧墙的水平向位移峰值, 提升整体抗震性能。

随着中国对于地下空间的开发利用, 国内各大城市正加快地铁等地下设施的建设, 然而, 目前国内外多以结构在地震或火灾单一灾害下的性能研究为主, 但对于地震及震后火灾等序列灾害下的研究较少。因此, 为了弥补现有研究的不足, 本文以两层三跨地下结构结构为对象, 采用数值分析的方法初步探讨地下结构结构在地震及震后火灾序列灾害作用下的动力响应规律, 为地下结构在序列灾害作用下的设计方法和计算理论提供支撑。。

1 数值分析方法

1.1 地铁地下车站及场地参数

采用常见的两层三跨钢筋混凝土地铁地下车站为研究对象,其横断面尺寸及主要配筋情况如图 1 所示。该地铁地下车站宽度为 21.2 m, 高度为 12.5 m, 顶板厚度为 0.7 m, 中板厚度为 0.35 m, 底板厚度为 0.8 m, 侧墙厚度为 0.8 m, 中柱采用直径为 0.8 m 的圆柱, 其纵向间距为 9.12 m。中柱与顶、底及中板的连接处都设置了不同尺寸的纵梁, 楼板与侧墙连接处进行了加腋处理。车站所在场地共计 9 层土, 总厚度为 80 m, 各土层分布及详细参数见表 1, 地下结构结构顶板上表面距地面 3 m。

表 1 场地土层参数
Table 1 Site parameters

土层 编号	土性	重度 ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹模 /MPa	厚度 /m	剪切波速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	动泊松 比
1	素填土	19.4	15.3	3.0	200	0.49
2	黏土	19.4	15.3	4.0	200	0.49

1.2 有限元分析模型

(1) 地下结构地震模型建立

土体采用基于 Davidenkov 骨架曲线的等价线性化本构模型^[14], 混凝土采用塑性损伤本构模型^[15]描述其在受拉和受压破坏时混凝土的刚度衰减规律, 车站结构混凝土强度为 C30, 其本构模型参数如表 2 以及图 2 所示。土体和车站结构采用四结点平面应变积分

单元, 混凝土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, 钢筋材料采用理想弹塑性模型, 其初始弹性模量为 210 GPa, 密度为 7800 kg/m³, 泊松比为 0.3。

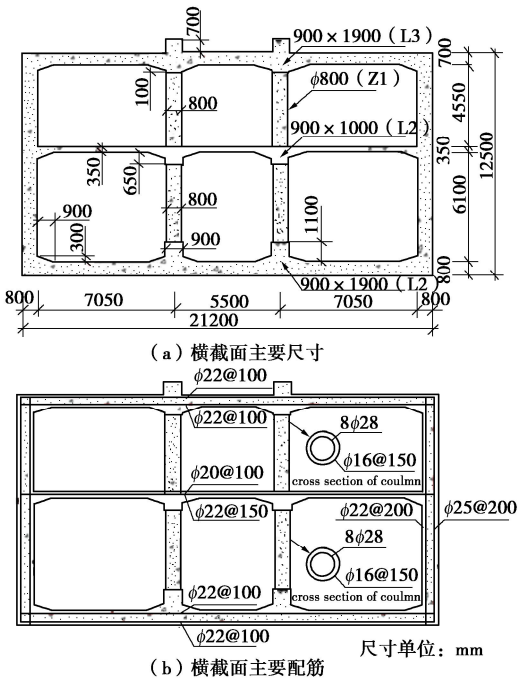


图 1 地铁地下车站结构横截面主要尺寸和配筋图
Fig. 1 Main dimensions and distributed steels of cross section

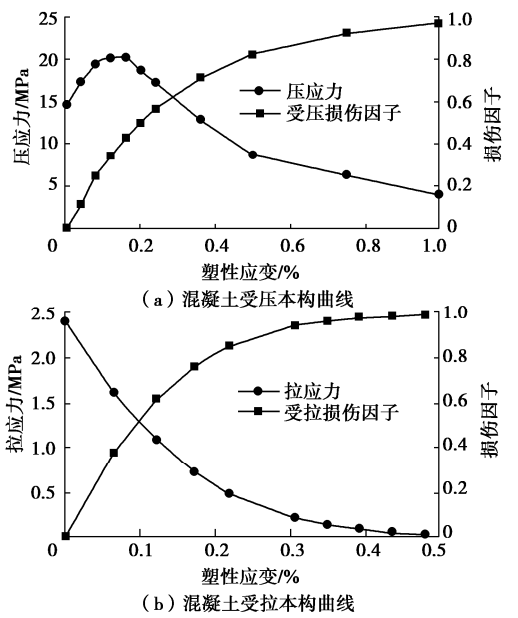


图 2 C30 混凝土本构曲线
Fig. 2 Constitutive curves of concrete No. 30

在把三维地下结构结构等效为二维平面应变问题时,对车站中柱采用同刚度等效的方法确定弹性模量, 即将圆形中柱等效为具有相同侧向抗弯刚度、厚度为 0.8 m 的连续墙, 其等效侧向抗弯刚度 $E_{eq}I_{eq}$ 可用下式表示:

$$E_{eq} I_{eq} = E_c I_c / L \quad , \quad (1)$$

式中， $E_c I_c$ 为中柱侧向抗弯刚度， L 为地下结构中柱纵向间距。等效后中柱混凝土弹性模量为 1.55×10^3 MPa，中柱钢筋弹性模量为 1.2×10^6 MPa。

场地模型尺寸的深度取 80 m，宽度取 200 m（约为车站结构宽度的 10 倍），以尽可能消除边界效应对动力响应结果的影响。动力分析时，模型基岩面采用竖向约束，水平方向为地震动激励，模型两侧边界设置等高度节点捆绑约束实现土体的剪切运动^[16]。土体与车站结构之间的动力接触考虑动力过程中的滑移与分离，法向接触采用“硬接触”，切向接触服从摩擦定律，本文摩擦系数取 0.4。利用 ABAQUS 软件建立地铁地下车站二维有限元模型，其网格划分如图 3 所示。

表 2 C30 混凝土材料参数

Table 2 Material parameters for concrete No. C30			
材料参数	参数值	材料参数	参数值
弹性模量	$E_0=3.0 \times 10^4$ MPa	极限受压屈服应力	$\sigma_{cu}=20.1$ MPa
泊松比	$\nu=0.2$	初始受拉屈服应力	$\sigma_{t0}=2.4$ MPa
密度	$\rho=2450$ kg/m ³	受压刚度恢复系数	$\omega_c=1.0$
膨胀角	$\Psi=36.31^\circ$	受拉刚度恢复系数	$\omega_c=0.0$
初始受压屈服应力	$\sigma_{c0}=13$ MPa	损伤因子 d_c, d_t (图 2)	

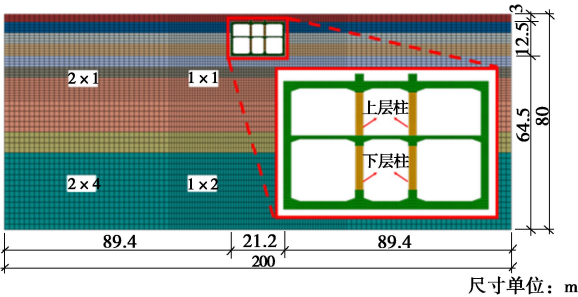


图 3 土-地铁车站相互作用体系有限单元划分
Fig. 3 Finite elements of soil-underground structure
(2) 地下结构火灾模型建立

基于地震分析的结果对其进行重启动分析，以地震作用最后时刻的状态作为重启动分析的起始状态，采用热-力耦合分析模型，即先进行地下结构火灾温度场计算，再将节点温度计算结果带入有限元模型中分析其力学行为。在进行火灾温度场模拟时，在受火面的热量通过热对流和热辐射从外界吸收，再通过热传导将热量传递至混凝土结构内部。

在进行温度场计算时，钢筋和混凝土的导热系数、比热容和热膨胀等热工参数参考欧洲规范 EC4^[17]，计算结果见表 3；钢筋和混凝土密度设为常数保持不变。

在进行力学分析时，采用与温度相关的材料弹性模量、热膨胀系数和本构关系等参数，高温下的混凝土材料参数参考 EC4 的公式取值，热膨胀系数参考李国强等^[17]的公式取值，其中混凝土本构参数仍采用 ABAQUS 塑性损伤模型 CDP，钢筋本构参数仍为理想弹塑性模型。混凝土在温度 T 时的抗压强度由下式计算：

$$f'_c \approx 0.84 f_{cu} \quad , \quad (2)$$

$$\frac{f'_{c,T}}{f'_c} = \begin{cases} 1.0 & (20^\circ\text{C} \leq T < 450^\circ\text{C}) \\ 2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) & (450^\circ\text{C} \leq T \leq 874^\circ\text{C}), \\ 0 & (T > 874^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f'_{c,T}$ ， f'_c ， f_{cu} 分别为混凝土在高温下圆柱体抗压强度，常温下圆柱体抗压强度和轴心抗压强度。

表 3 混凝土及钢筋的热工参数

Table 3 Thermal parameters of concrete and steel bars						
温度 /°C	混凝土热工参数			钢筋热工参数		
	导热系数	比热容	热膨胀系数	导热系数	比热容	热膨胀系数
20	1.96	913	6.16×10^{-6}	53.3	440	1.2×10^{-5}
100	1.81	964	6.8×10^{-6}	50.7	489	1.22×10^{-5}
200	1.63	1022	7.6×10^{-6}	47.3	530	1.25×10^{-5}
300	1.47	1075	8.4×10^{-6}	44.0	565	1.27×10^{-5}
400	1.33	1122	9.2×10^{-6}	40.6	606	1.30×10^{-5}
500	1.21	1164	1.0×10^{-5}	37.3	667	1.32×10^{-5}
600	1.10	1200	1.08×10^{-5}	34.0	760	1.35×10^{-5}
700	1.01	1231	1.16×10^{-5}	30.7	991	1.37×10^{-5}
800	0.93	1256	1.24×10^{-5}	27.4	795	1.40×10^{-5}
900	0.87	1275	1.32×10^{-5}	27.3	650	1.42×10^{-5}
1000	0.83	1289	1.40×10^{-5}	27.3	650	1.45×10^{-5}

1.3 荷载工况

在数值分析计算过程中，首先施加地震荷载，在地震动激励结束后使结构自由振动，直至恢复静止状态；以震后结构的受力状态、变形情况及材料损伤状态，对结构施加温度场，进行结构热力分析，模拟震后地铁车站在火灾中的灾变行为。

选取 EL-Centro 波作为基岩输入地震动，EL-Centro 波为 1940 年美国 Imperial 山谷地震时记录的强震地震波，具有明显的中远场地震波特征，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。在基岩面水平方向输入上述地震动时，将其峰值加速度调整为 0.4g，持续时间为 30 s，地震动加速度时程如图 4（a）所示。火灾分析中，采用 HC 升温曲线，如图 4（b）所示，模拟地下结构底部 3 个空间同时着火场景。火灾发生前的环境温度为 20℃，火灾持续时间 1 h，最高温度为 1079℃。

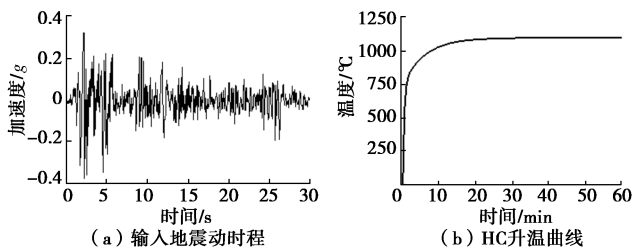


图 4 输入荷载曲线
Fig. 4 Curves of input loads

2 计算结果分析

本文首先阐述了地下结构地震作用下的灾变行为, 然后通过与只经历火灾的地铁车站进行对比, 研究地震损伤对地铁车站抗火性能的影响。

2.1 结构地震响应分析

考虑到地铁地下车站结构一层的地震变形响应及损伤程度大于二层^[18], 因此本文选取侧墙、中柱、楼板等构件重点分析结构一层的变形情况。在地震作用下车站结构各构件的层间变形响应具有相同的变化趋势, 且相同构件的变形响应时程基本一致, 仅有微小差异, 其峰值变形及震后残余变形列于表 4。侧墙、中柱、楼板的层间位移峰值分别约为 34.8, 40.1, 37.6 mm, 残余变形也均小于 5.5 mm。需要注意的是, 在整个地震响应过程中, 结构左侧墙和右侧墙的变形响应出现明显波动, 如图 5 所示, 且地震动结束后的残余变形相差近 4 倍。上述结果的主要原因是地下结构结构受到周围土体的约束作用, 土体在地震作用下产生非线性变形, 结构左右侧墙在与土体挤压、摩擦、分离过程中出现非一致变形。本文一层层间变形与文献[18]结果基本一致, 验证了本文数值方法的合理性。

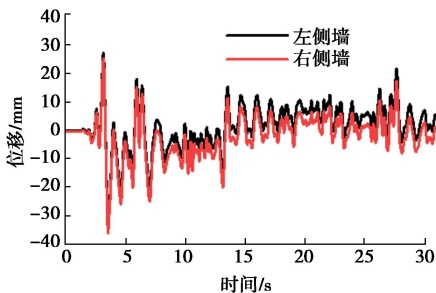


图 5 地震作用下地下结构侧墙层间变形响应时程
Fig. 5 Time histories of inter-story drift of station wall under earthquake

表 4 构件变形

Table4 Deformations of components

构件	峰值变形/mm	残余变形/mm
左侧墙	33.77	5.44
右侧墙	35.85	1.14
楼板	39.92	3.75
左柱	37.93	4.03
右柱	37.30	5.35

2.2 地震基础上的火灾计算

(1) 地震次生火灾对于地铁车站整体影响

火灾发生后 15, 30, 60 min 时, 地铁车站的整体变形及温度分布如图 6 所示。可见, 在火灾升温过程中, 热量由车厢内表面向混凝土内部扩散, 沿着混凝土构件的厚度方向温度成层装分布。在火灾作用下, 结构左柱和右柱不再呈剪切变形, 而是受温度影响膨胀凸起; 一层结构侧墙仍为剪切变形, 变形随温度升高而逐渐增大; 一层中板挠度增大; 一层底板由于柱子的约束导致不均匀变形, 出现局部凸起现象。随着火灾温度的升高, 结构柱、侧墙和中板受火面的温度变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 在火灾中各个构件升温速度先逐渐增大, 在 25 min 后逐渐减缓, 中板受火面升温最快, 与侧墙受火面升温曲线较为接近, 而柱的升温速度就相对较慢。

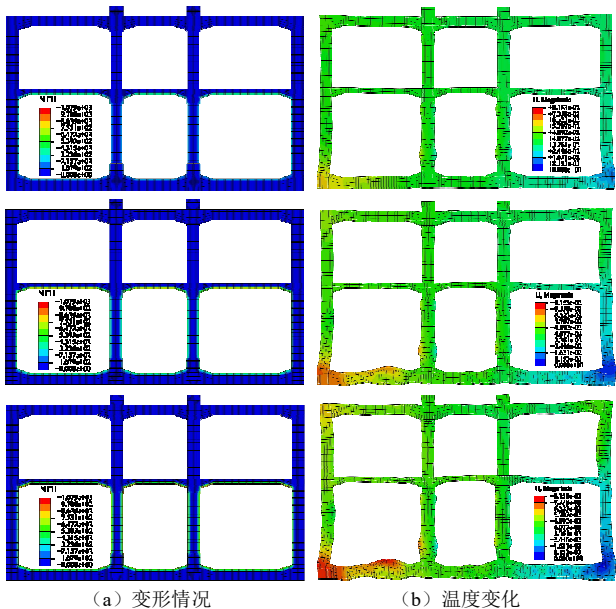


图 6 火灾中地下结构变形情况及温度变化云图 (15, 30, 60 min)

Fig. 6 Structural deformations and heat distribution of station in fire (15, 30, 60 min)

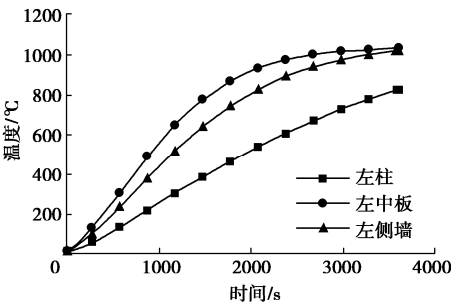


图 7 火灾中地下结构温度变化各部位最高温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curves of components in fire

通过比较经历地震影响的结构与不经历地震影响

的结构在火灾下的1楼层间位移反应时程,研究地震及其次生火灾对结构整体变形的影响,图8给出考虑地震损伤与不考虑地震损伤时,火灾中结构层间位移反应时程。由图8可知,在火灾发生之前,结构存在3.75 mm的地震残余位移;随着火灾的发生,结构层间位移经历了先减小后迅速增大的情况,火灾发生2 min后,经历过地震的结构层间位移为2.72 mm,而未经历过地震的结构层间位移为0.13 mm;13 min后,层间位移快速增大,至39 min后层间位移逐渐减小,火灾发生1 h后,考虑地震影响的结构层间位移为5.06 mm,不考虑地震影响的结构层间位移为4.41 mm。

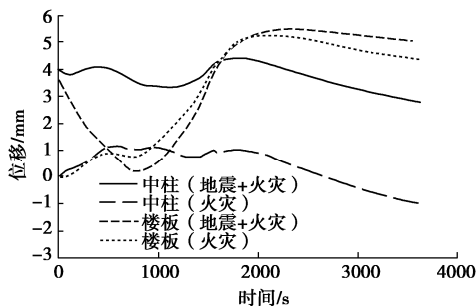


图8 火灾中结构层间位移时程

Fig. 8 Time histories of structural inter-story drift in fire

通过上述位移时程图可以发现,只考虑火灾影响的地铁车站与既有地震破坏又有火灾影响的地铁车站相比,地震次生火灾对地铁车站的层间位移增大了约0.65 mm,地震对于地铁车站的破坏加剧了火灾对于地铁车站的影响。

(2) 地震次生火灾对于地铁车站中柱影响

柱子作为地下结构的主要支撑结构,是可能导致地铁车站倒塌的重要构件,在地震中会受到严重的破坏,因此需要对其经历地震后火灾的灾变行为进行分析研究,所以拿出一层左柱,比较其在火灾单独作用和经历地震影响后火灾作用的灾变行为。图8给出了结构一层左柱在地震与次生火灾作用下,以及火灾单独作用下的柱顶与柱底相对位移时程。由图可知,在单独火灾影响下,结构左柱变形迅速增大,在590 s达到1.11 mm,随后,左柱变形保持平缓,在936 s时达到最大值1.2 mm,在到达最大值后,左柱变形反向增大,柱顶与柱底相对位移保持着一个缓慢下降的态势,在1772 s后反向变形迅速增大,且随时间线性变化1 h后残余变形为0.96 mm。当考虑结构经历地震影响后的火灾灾变行为时,可以发现,在火灾发生时一层左柱存在4.03 mm的地震残余变形;随着震后火灾的发生,左柱经历变形先增大后减小,再增大再减小的变化,与只经历火灾影响的地铁车站变形过程相似,其变形最大值在1784 s时达到4.4 mm。

通过上述数据的比较可以发现,地下结构在经历过地震损伤后,在火灾作用下其左柱的变形更大,震后火灾中地下结构左柱的柱顶与柱底相对位移较不考虑地震影响时明显增大。

3 结 论

本文通过对一个三跨两层地下结构的二维非线性数值模拟,讨论了地铁车站在地震以及地震次生火灾作用下的变形情况,阐述了地震与地震次生火灾对地铁车站的影响,得到以下3点结论。

(1) 地震作用下地铁地下车站一层各构件的变形响应具有相同趋势,相同构件的变形响应具有一致性,而左右侧墙变形出现差异,其原因在于车站结构变形周围土体的影响,土体在地震作用下产生的非线性变形导致结构左右侧墙的非一致变形。

(2) 与地震破坏相比,地震及其次生火灾破坏会放大结构变形,车站中柱结构在火灾破坏下表现为两侧凸起的破坏形式。

(3) 与仅受火灾时相比,地震及震后火灾作用下车站结构的增减位移被放大了14.8%,表明初始震损放大了火灾的破坏效应。

参考文献:

- [1] 赵凯,王秋哲,王彦臻,等.可液化地基地下结构地震反应特征简化有效应力分析[J].振动与冲击,2021,40(21): 39-46. (ZHAO Kai, WANG Qiu-zhe, WANG Yan-zhen, et al. Effects of soil-underground structure interaction on seismic response of liquefiable sit around underground structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 39-46. (in Chinese))
- [2] 唐柏赞,李小军,陈苏,等.可液化地基-非规则截面地下结构地震变形研究[J].振动与冲击,2020,39(11): 217-225. (TANG Bai-zan, LI Xiao-jun, CHEN Su, et al. Seismic deformation characteristics of liquefaction soil-irregular section underground structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 217-225. (in Chinese))
- [3] 李延涛,田野,宗金辉,等.受相邻上部结构影响的隧道-土体系振动台试验研究[J].振动与冲击,2020,39(3): 233-241, 259. (LI Yan-tao, TIAN Ye, ZONG Jin-hui, et al. Shaking-table tests for seismic response of tunnel-soil system affected by adjacent upper structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3): 233-241, 259. (in Chinese))
- [4] 王建宁,马国伟,窦远明,等.异跨框架式地铁地下车站结构抗震性能水平与评价方法研究[J].振动与冲击,2020,39(10): 92-100. (WANG Jian-ning, MA Guo-wei, DOU

- Yuan-ming, et al. Performance levels and evaluation method for seismic behaviors of a large-scale underground subway station with unequal-span frame[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(10): 92 – 100. (in Chinese))
- [5] 陈素文, 李国强. 地震次生火灾的研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2008, **17**(5): 120 – 126. (CHEN Su-wen, LI Guo-qiang. Advance in research on secondary fire of earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, **17**(5): 120 – 126. (in Chinese))
- [6] DANIELL J E, SCHAEFER A M, WENZEL F. Losses associated with secondary effects in earthquakes[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2017, **3**: 30.
- [7] 陈适才, 田小明, 闫维明, 等. 建筑结构地震火灾效应分析方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, **33**(6): 90 – 95, 119. (CHEN Shi-cai, TIAN Xiao-ming, YAN Wei-ming, et al. A preliminary survey on analysis method of building structures under post-earthquake fire[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, **33**(6): 90 – 95, 119. (in Chinese))
- [8] BURSI O S, FERRARIO F, PUCINOTTI R, et al. Seismic-induced fire analysis of steel-concrete composite beam-to-column joints: bolted solutions[C]// *International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete* 2008. Reston, VA, 2008.
- [9] WEN B, WU B, NIU D T. Post-earthquake fire performance of reinforced concrete columns[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, **12**(9): 1106 – 1126.
- [10] ARABLOUEI A, et al. Effect of fire insulation delamination on structural performance of steel structures during fire following an earthquake or an explosion[J]. *Fire Safety Journal*, 2016, **84**: 40 – 49.
- [11] 苗吉军, 王俊富, 刘才玮, 等. 损伤后混凝土框架结构火灾试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, **33**(2): 1 – 9. (MIAO Ji-jun, WANG Jun-fu, LIU Cai-wei, et al. Experimental research on RC frame structure with damages due to elevated temperature[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, **33**(2): 1 – 9. (in Chinese))
- [12] 李文婷, 陈清军. 地震次生火灾中城市地铁地下结构的灾变性能研究[J]. *振动与冲击*, 2021, **40**(14): 153 – 161, 179. (LI Wen-ting, CHEN Qing-jun. Damage performance of underground structures in earthquake-induced fire[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, **40**(14): 153 – 161, 179. (in Chinese))
- [13] 陈 阳, 陈清军. 火灾后 CFRP 加固地下结构结构的地震反应[C]//第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册). 南昌, 2019: 401 – 405. (CHEN Yang, CHEN Qing-jun. Seismic response of subway station structures reinforced by CFRP after fire[C]//The 28th National Conference on Structural Engineering (Volume I). Nanchang, 2019: 401 – 405. (in Chinese))
- [14] 赵丁凤, 阮 滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(5): 888 – 895. (ZHAO Ding-feng, RUAN Bin, CHEN Guo-xing, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(5): 888 – 895. (in Chinese))
- [15] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(8): 892 – 900.
- [16] WANG J N, et al. Influence of diaphragm wall on seismic responses of large unequal-span subway station in liquefiable soils[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **91**: 102988.
- [17] 李国强, 韩林海, 楼国彪. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (LI Guo-qiang, HAN Lin-hai, LOU Guo-biao. And Fire Resistance Design of Steel Structure and Steel-Concrete Composite Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))
- [18] 庄海洋, 任佳伟, 王 瑞, 等. 两层三跨框架式地铁地下车站结构弹塑性工作状态与抗震性能水平研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(1): 131 – 138. (ZHUANG Hai-yang, REN Jia-wei, WANG Rui, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station having two layers and three spans[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(1): 131 – 138. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)