

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202007013

# 上盖一体化地铁车站结构非线性地震响应分析\*

韩学川, 陶连金, 安韶, 史明

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 基于ABAQUS软件建立了地下地铁车站-土-上盖建筑一体化结构大型三维有限元数值模型, 计算分析了上盖一体化地铁车站结构的地震响应规律和破坏机理, 探讨了上盖一体化地铁车站结构与单体车站结构地震响应的差异。结果表明: 地铁上盖一体化结构体系各阶自振频率与自由场地较为接近, 地铁上盖结构的存在对场地动力特性的影响较小; 强震作用下, 一体化地铁车站结构的损伤破坏区域主要是车站各层楼板和墙柱的交接位置, 尤其是中柱和侧墙顶底部的损伤最为严重; 单体车站与上盖一体化地铁车站结构地震响应规律存在一定差异, 上盖一体化地铁车站结构的地震反应略小, 其中, 上盖地铁车站结构的地震响应同时受上盖结构和周围土体介质的影响, 上盖结构对上盖地铁一体化区域的影响显著, 周围土体对上盖地铁非一体化区域的影响显著。

**关键词:** 一体化结构; 地震响应; 破坏机理; 地铁上盖结构

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0788-08

## Nonlinear Seismic Response Analysis of Integrated Subway Station Structure

HAN Xuechuan, TAO Lianjin, AN Shao, SHI Ming

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the ABAQUS software, a large-scale three-dimensional finite element numerical model of the underground subway station-soil-superstructure integrated structure was established. The seismic response law and failure mechanism of the superstructure integrated subway station structure were calculated and analyzed, and the differences in seismic response between superstructure integrated subway station structures and monolithic station structures were discussed. The results show that the natural vibration frequency of each order of the integrated structure in the subway superstructure is relatively close to that of the free site, and the presence of the subway superstructure has little effect on the dynamic characteristics of the site; The damage and destruction area of the integrated subway station structure is mainly distributed in the location of the intersection of the floor slabs and wall columns under the effect of strong earthquakes, especially in the location of the center column and the top and bottom of the side walls. The seismic response of the monolithic station structures and the integrated subway station structures is different. The seismic response of the integrated subway station structure is slightly smaller. The seismic response of the superstructure subway station is simultaneously affected by the superstructure and surrounding soil medium. The superstructure has a significant impact

\* 收稿日期: 2020-07-14; 修回日期: 2020-11-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805403)资助

作者简介: 韩学川(1984—), 男, 博士研究生。主要从事地下结构抗震研究。E-mail: tshanxuechuan@126.com

on the integrated area of the superstructure and the surrounding soil obviously affects the non-integrated areas.

**Keywords:** integrated structure; earthquake response; failure mechanism; subway superstructure

## 引言

为了实现土地资源集约化利用水平,地下地铁车站规划建设中,综合考虑场站周边用地和地下地铁车站的整体开发模式,是解决城市土地资源紧缺,改善交通拥堵,促进地下和地上立体空间有机整合的重要途径。地铁上盖结构加强了地铁车站与周边用地一体化规划及场站用地综合利用,提高了地铁车站的综合开发利用水平,使城市资源得到了合理利用<sup>[1]</sup>。因此,地铁上盖一体化结构可能会成为未来一体化结构设计的主要趋势。

目前,关于复杂结构及邻近地面结构与地下结构相互作用的研究较多,张天宇等<sup>[2]</sup>基于ABAQUS软件研究了地铁车站及其上盖结构体系的地震反应特征,探讨了竖向地震动效应和转换梁刚度的影响。王淮峰等<sup>[3]</sup>利用ANSYS有限元程序建立了一系列典型高层框架结构及地下车站的二维平面应变模型,研究了地上结构对地下结构地震动力响应的影响参数;K. Pitilakis等<sup>[4]</sup>针对地下圆形隧道地震响应规律进行了研究,分别考虑了单个和多个相邻地表结构的影响;郭靖<sup>[5]</sup>分别从场地类型和埋深等方面,研究了地表建筑对地下结构的影响范围。E. S.M. Robb等<sup>[6]</sup>以动强度为主要相似参数进行了模型土的设计,研究了地震作用下地铁-结构相互作用,试验结果达到预期强度范围。J.S. Choi等<sup>[7]</sup>、H. Huo等<sup>[8-9]</sup>、R.W. Boulanger等<sup>[10]</sup>通过地下结构与地面结构地震响应的对比总结了一些经验规律。由于地铁上盖一体化结构也是近几年才大量出现且常见于地铁车辆段,而地铁车站运营段上盖案例相对较少,如天津地铁6号线北运河站。地铁上盖结构的地震响应特性及破坏机理尚不明确,同时,建筑行业对城市轨道交通结构、地上建筑混凝土结构等均有相关规程,但缺少针对地铁上盖结构的抗震设计指导规范,这与我国地铁上盖结构建设规模及前景不相匹配。

本文以某在建地铁上盖一体化结构为工程背景,基于ABAQUS软件建立了地下地铁车站-土-上盖建筑一体化结构的大型三维有限元数值

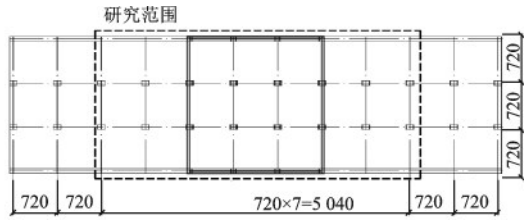
模型,研究了上盖一体化地铁车站结构地震响应规律和破坏机理,探讨了上盖一体化地铁车站结构与单体车站结构地震响应的差异,以期为相似工程的抗震设计提供参考依据。

## 1 土-地铁上盖一体化结构体系的有限元计算模型

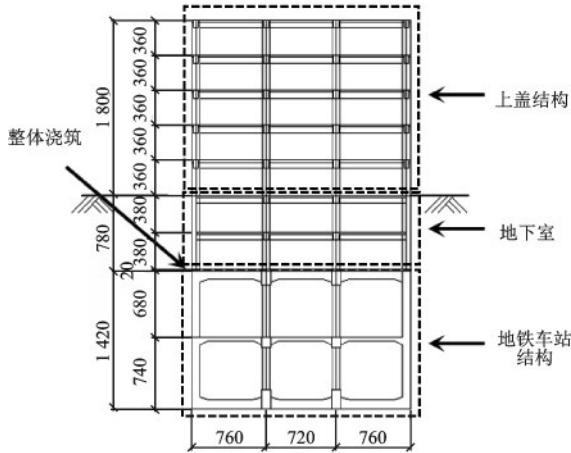
### 1.1 计算模型

本文基于有限元软件ABAQUS,以某在建地铁上盖一体化结构(图1)为背景,建立了地下地铁车站-土-上盖建筑一体化结构的大型三维有限元数值模型,地铁车站为两层三跨箱型结构,上盖结构为5层框架结构,其中,车站宽22.4 m,高14.2 m,顶板厚0.8 m,中板厚0.4 m,底板厚1.0 m,侧墙厚0.8 m,中柱截面0.8 m×1.2 m,间距7.2 m。上盖结构层高3.6 m,地上5层,地下2层,中柱截面0.8 m×0.8 m。考虑到计算模型的端部效应,截取模型中间区域为研究范围,如图1(a)所示,通过计算分析,着重研究地铁车站结构在水平地震作用下的地震动力响应规律,揭示上盖地铁车站结构的地震破坏机制。最后,对比上盖一体化地铁车站结构与单体地铁车站地震响应的差异,以期为相似工程的抗震设计提供参考。

基于ABAQUS软件建立“土-上盖一体化结构”三维有限元静-动力耦合计算模型,土-上盖一体化结构体系数值模型尺寸为158 m×83 m×46 m,基于王淮峰等<sup>[3]</sup>研究成果,地基平面尺寸与结构平面尺寸之比为7,满足边界尺寸要求。采用八节点减缩积分实体单元(C3D8R)模拟土体介质,采用八节点全积分实体单元(C3D8)模拟上盖一体化结构,模型单元总数为196 514。网格划分满足R.L. Kuhlemeyer等<sup>[11]</sup>提出的精度表达式,即单元的空间尺寸,必须小于与输入地震波主频率相应波长的1/8~1/10。三维有限元计算模型,如图2所示。由于地下结构与周围土体性质差异较大,土体与地下结构之间的相互作用采用接触对的方法进行模拟,利用拉格朗日乘子法(Lagrangian Multiplier Method)和罚函数法(Penalty Function Method)等动力接触算



(a) 一体化结构区域分布



(b) 一体化结构横截面

图1 一体化结构区域分布及尺寸示意

Fig.1 Regional distribution and dimension diagram of integrated structures

法可较好模拟土体与地下结构的动力接触。土与上盖一体化结构采用面面接触,法向接触采用“硬接触”,切向接触面采用“有限滑动”,服从Coulomb摩擦定律,土与上盖一体化结构之间的摩擦系数取为0.4,满足位移协调一致原则。

## 1.2 材料参数

模型地基和上盖一体化结构均采用三维实体

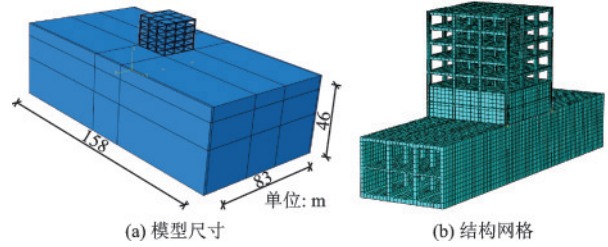


图2 三维有限元计算模型

Fig.2 Three-dimensional finite element calculation model

单元进行模拟。土体采用Mohr-Coulomb破坏准则,土体参数详见表1。一体化结构混凝土强度为C40,其中,上盖结构采用线弹性模型进行计算;地铁车站采用混凝土动力塑性损伤本构模型(CDP模型)来模拟混凝土的非弹性行为,结合规范<sup>[12]</sup>给出的单轴加载作用下的混凝土材料本构关系,利用能量等效假设计算得到所需参数。该模型基于各向相同破坏假设,同时考虑了由于拉压塑性应变导致的弹性刚度退化以及循环荷载作用下的刚度恢复,适用于单向加载、循环加载及动态加载等情况,车站结构材料参数及混凝土塑性损伤参数取值详见表2、表3。

## 1.3 边界条件

在对上盖一体化地铁车站的地震反应进行有限元分析时,需要在有限计算区域边界上设置合理的边界条件,从而实现对土体-上盖地铁车站结构动力相互作用的准确模拟。本文采用黏弹性人工边界单元<sup>[12-13]</sup>,把波动作用转换成人工边界节点作用力来实现波动的模拟。通过FORTRAN语言编写的一套辅助程序,实现了有限元ABAQUS软件中

表1 土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil layers

编号	名称	厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	动弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
1	① <sub>1</sub> 素填土	2.5	19.00	0.38	127	8	10
2	② <sub>1</sub> 粉土	13.5	20.00	0.37	183	30	20
3	③ <sub>s</sub> 粉质黏土	6.8	19.70	0.36	317	36	21
4	⑦卵石圆砾	22.2	21.50	0.35	898	0	40

表2 混凝土动力本构模型计算参数

Table 2 Calculation parameters of concrete dynamic constitutive model

名称	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	剪胀角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	压缩屈服应力/MPa	压缩极限应力/MPa	拉伸失效应力/MPa	受拉损伤恢复因子	受压损伤恢复因子
C40	2 400	30	32 500	0.2	10.01	26.8	2.39	0	1

表 3 混凝土塑性损伤参数

Table 3 Plastic damage parameters of concrete

混凝土压缩损伤参数			混凝土拉伸损伤参数		
压应力/Pa	非弹性应变	损伤	拉应力/Pa	开裂应变	拉伸损伤
10 728 040	0	0	1 912 760	0	0
18 871 730	0.000 112 04	0.073 498 14	2 273 100	7.23E-06	0.020 007 44
20 211 850	0.000 147 15	0.093 085 59	2 390 000	1.82E-05	0.058 164 24
22 925 920	0.000 248 13	0.140 180 49	2 270 150	3.60E-05	0.112 104 28
25 624 380	0.000 440 24	0.208 790 82	2 030 490	6.05E-05	0.191 979 64
26 800 000	0.000 746 01	0.292 205 63	1 910 230	7.27E-05	0.233 602 18
24 112 010	0.001 401 27	0.422 985 04	1 670 840	9.90E-05	0.322 345 06
20 076 450	0.002 061 41	0.529 270 87	1 311 280	0.000 148 78	0.472 826 84
18 733 830	0.002 295 16	0.562 380 42	1 191 150	0.000 170 37	0.527 881 07
14 703 220	0.003 123 74	0.661 496 95	951 980	0.000 227 57	0.643 839 85
9 334 580	0.004 935 01	0.797 840 63	593 310	0.000 402 18	0.824 675 91
6 653 370	0.006 708 13	0.867 456 25	473 770	0.000 528 43	0.881 245 31

设置黏弹性边界条件和施加等效荷载,黏弹性边界施加流程,如图 3 所示。

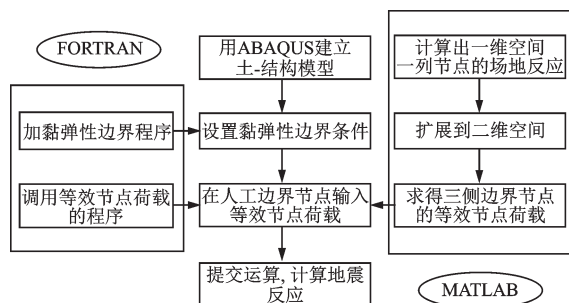


图 3 黏弹性边界施加流程示意

Fig.3 Schematic diagram of viscoelastic boundary application process

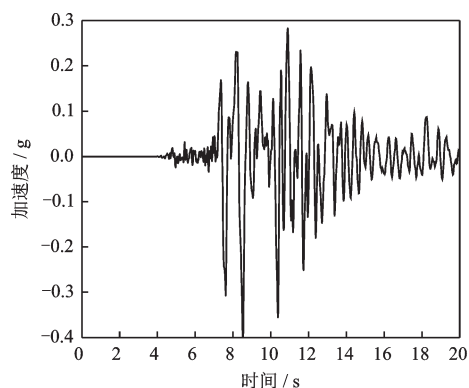
### 1.4 地震波选择

地震波选择神户海洋气象台观测点记录的阪神反演波作为基岩水平向输入地震动,地震波入射方向与车站纵向轴线垂直,其振动方向与结构横断面垂直,将地震波加速度峰值调整为 0.4g,本文选取地震波振动最为明显区段的前 20 s,地震动的加速度时程曲线和频谱如图 4 所示。

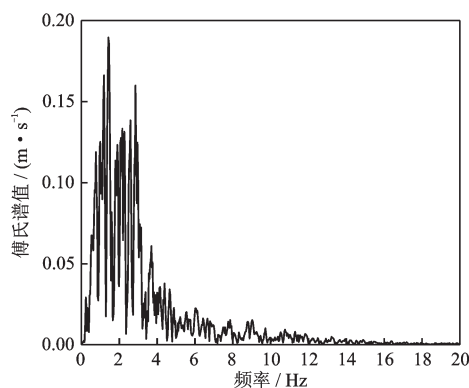
## 2 计算结果与分析

### 2.1 模态分析

自振频率是反映研究对象动力特性一个重要



(a) Kobe波时程曲线



(b) Kobe波频谱

图 4 地震动时程曲线及频谱

Fig.4 Time history curve and frequency spectrum of ground motion

指标。基于大型通用有限元程序 ABAQUS 软件,运用线性摄动方法并采用 Lanczos 特征值求解器分别计算土-地铁上盖结构体系和自由场地前十阶自振频率。图 5 给出了土-地铁上盖结构体系和自由

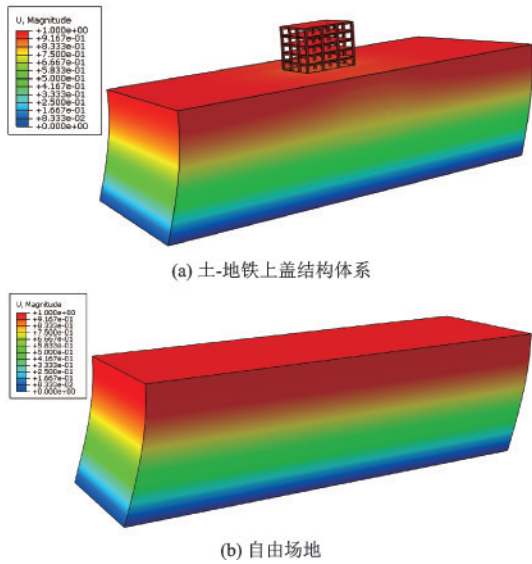


图5 模型第一阶振型

Fig.5 First order vibration mode of model

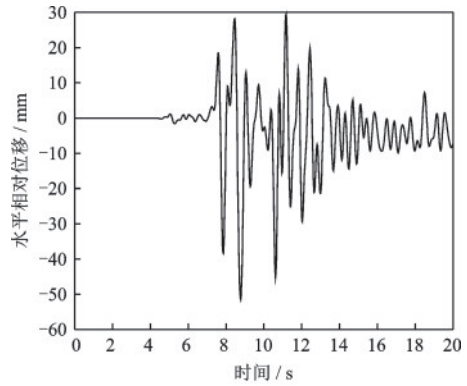
场地计算模型的第一阶振型,表4给出了两种计算模型的前十阶自振频率。

由表4可知,自由场和土-上盖结构体系前十阶自振频率相差不大,尤其是两种体系模型所对应的低阶自振频率及一阶振型(图5)基本相同,这是由于结构相对土体介质所占体积较小,与同体积土层置换后的土-结构体系的刚度不会有明显的改变。两种计算模型的高阶自振频率相差较大,说明上盖建筑的高阶振型对体系高阶自振频率的影响不可忽视。

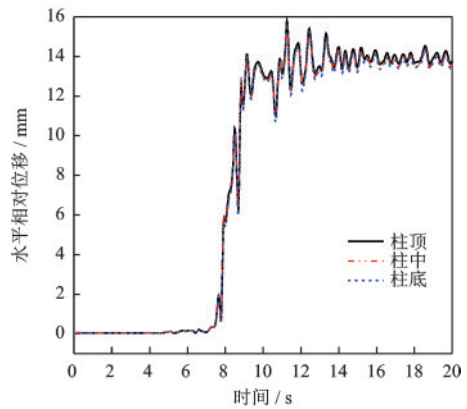
## 2.2 上盖一体化地铁车站结构变形规律分析

现将地铁车站结构顶板与底板位移差的幅值定义为车站结构的相对位移。图6给出了地铁车站中柱不同监测部位的相对水平位移时程曲线和竖向位移时程曲线。

如图6所示,当计算到8.92 s时,地铁车站中柱水平方向发生了较明显的塑性变形,此时,中柱顶底部的相对水平位移为51.4 mm,层间位移角为1/235,超出结构抗震性能Ⅱ<sup>[14]</sup>层间位移角的限值1/250,其与车站结构损伤破坏规律相符。车站中柱各测点的竖向位移时程曲线基本相同,说明车站



(a) 中柱顶底部相对水平位移时程曲线



(b) 中柱各测点竖向位移时程曲线

图6 中柱位移时程曲线

Fig.6 The time history curve of middle column displacement

结构的竖向位移基本趋于一致,其中,柱顶的竖向位移最大,柱底的竖向位移最小。当计算至7.86 s时,地铁车站中柱发生了严重的竖向变形,主要是因为地震激励作用下,地铁车站中柱发生了塑性损伤破坏,部分构件连接部位刚度减小,结构发生内力重分布,车站出现明显的塑性变形。

## 2.3 上盖一体化地铁车站结构地震损伤分析

采用拉伸损伤因子描述结构的破坏规律。损伤因子的取值范围从0到1,取值为0时,表示材料无损伤破坏,当取值为1时,表示材料已完全损伤破坏。图7给出了地铁车站结构截面1位置的拉伸损伤云图。通过对上盖地铁车站结构损伤云图分析,评估地铁车站结构的损伤情况及破坏过程。

表4 模型前十阶自振频率

Table 4 The first ten natural frequencies of the model

单位:Hz

计算模型	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶	8阶	9阶	10阶
土-上盖结构体系	1.081 8	1.463 4	1.463 4	1.508 7	1.508 7	1.575 0	1.575 0	1.579 4	1.579 4	1.594 6
自由场地	0.998 9	1.969 6	2.235 9	2.806 5	2.995 6	3.441 2	3.537 6	3.600 5	3.978 4	4.061 9

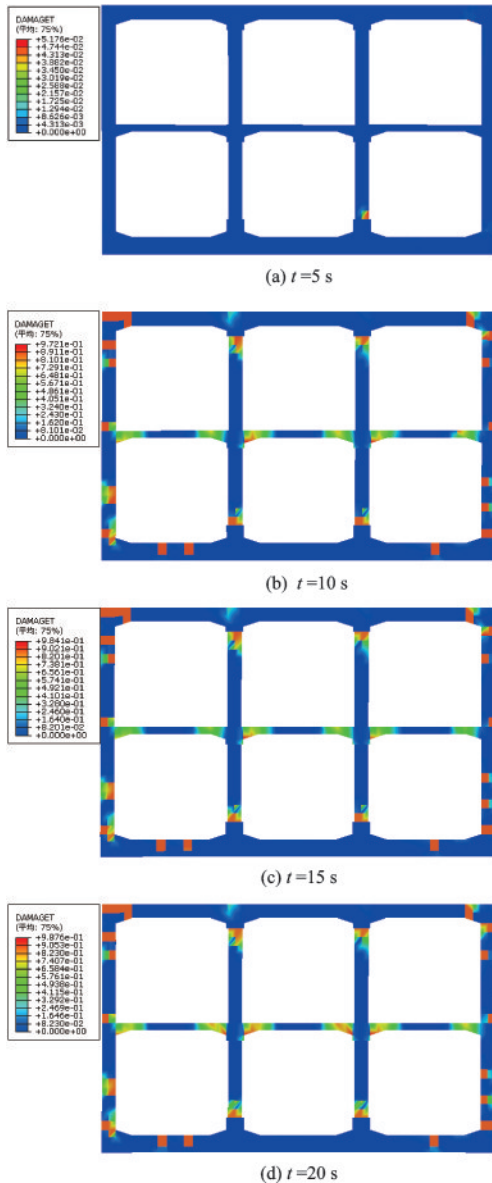


图7 Kobe波作用下结构拉伸损伤云图

Fig.7 Contour map of structural damage under Kobe waves

可以看出,激振初期,上盖一体化地铁车站结构底层中柱底部位置最早出现了拉伸损伤;当计算到10 s时,地震波已达到峰值加速度,此时,在地铁车站顶层柱顶、顶层侧墙顶底部、底层柱底、底层侧墙底部和中部以及楼板和墙柱的交接位置均出现了明显的拉伸损伤,尤其是车站中柱底部与侧墙顶部位置的拉伸损伤最严重,拉伸损伤因子基本达到了1.0,说明在这些部位的混凝土已经处于完全受拉破坏;当计算到15 s直至结束时,结构的拉伸损伤云图未再发生明显改变,这是因为模型计算后期,地震波振动已大幅度衰减,地震能量不足已对结构造成更严重的破坏。

从结构的拉伸损伤发展规律分析震害演变过

程为:激振初期,结构底层中柱柱底率先出现拉伸损伤(图7(a)),随后车站顶层柱顶、顶层侧墙顶底部、底层侧墙底部和中部以及楼板和墙柱的交接位置陆续出现拉伸损伤(图7(b~d)),激振后期(10 s后)车站结构的损伤云图基本相同,损伤因子略有增加。在整个计算过程中,底层中柱由于截面尺寸较小承载力相对薄弱而最先出现损伤,随着损伤范围的增大并逐渐演变为塑性铰,结构发生内力重分布,侧墙承担了大部分竖向荷载以及地震荷载。

### 3 上盖一体化地铁车站与单体车站地震响应对比分析

为了便于分析上盖一体化地铁车站结构与单体车站结构地震响应特性的差异,在上节的基础上建立单体地铁车站结构,模型计算参数同上,采用神户海洋气象台观测点记录的阪神反演波作为基岩水平向输入地震动,将地震波加速度峰值调整为0.2g,分别从变形和应力等方面进行分析。

#### 3.1 变形规律分析

图8给出了上盖一体化地铁车站与单体车站层间相对水平位移沿车站纵轴的变化曲线。

从图8可以看出,两种结构的层间相对水平位移沿纵轴的变化曲线存在明显的差异,上盖一体化地铁车站的层间相对水平位移相对较小,顶层表现为两端大中间小的趋势,底层表现为两端小中间大的趋势;单体车站的层间相对水平位移则表现为中间大两侧小的趋势,符合一般地铁车站的层间相对位移分布规律<sup>[15]</sup>。这是因为一方面,上盖一体化结构属于竖向悬臂结构,地下结构承担的倾覆地震荷

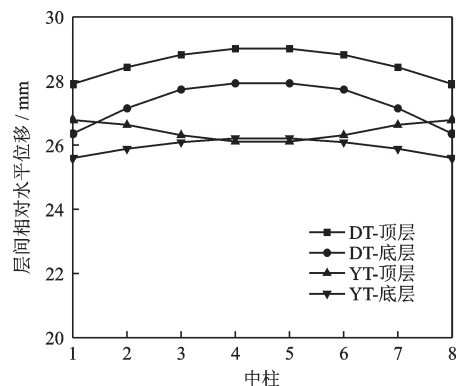


图8 地铁车站相对水平位移

Fig.8 Relative horizontal displacement of subway station

载沿某一临界深度呈反对称三角形分布,上盖一体化结构顶部(地下室部分)承担了大部分倾覆地震荷载,导致地铁车站上盖区域结构顶层层间水平位移较小,而地下结构底部至临界深度范围内的抗倾覆地震荷载随埋深的增加逐渐增大,地下结构底部位置受荷较大;另一方面,地下结构埋置于土体介质中,受周围土体约束作用显著,地下结构所受地震荷载呈倒三角形分布,表现为随埋深的增加逐渐减小;由于上盖一体化结构兼备地上结构和地下结构两部分,一体化结构的地震效应是土体与两种结构复杂耦合作用的结果,从而导致车站上盖区域顶层层间相对水平位移呈减小的趋势,而底层受上盖结构的影响较小,位移表现出与单体车站结构相似分布规律。说明上盖地铁车站的层间相对水平位移受上盖结构和周围土体介质的双重作用,上盖区域受地上结构的影响显著,非上盖区域受周围土体的影响显著。

### 3.2 结构应力分析

图9给出了单体地铁车站结构与上盖一体化地铁车站结构的最大主应力云图。

在地震作用下,单体地铁车站结构与一体化地铁车站结构的最大内力反应均发生在结构构件的连接部位,应力云图很好的反映了这个特点。其中,单体车站结构的最大主应力较大值主要分布在车站中柱的顶部和底部、中板边支座以及侧墙顶部位置;上盖一体化地铁车站结构的最大主应力小

于单体车站结构,最大主应力减小了5.6%,说明相同地震强度作用下,单体车站结构更容易发生结构破坏。

## 4 结 论

本文基于有限元ABAQUS软件,开展了“地下地铁车站-土-上盖建筑一体化结构”三维有限元静-动力耦合数值仿真分析,结论如下:

(1)上盖一体化结构体系各阶自振频率与自由场地较为接近,结构的存在对场地土动力特性的影响较小,从工程的角度看可忽略不计。

(2)强震作用下,上盖一体化地铁车站结构的水平和竖向方向均发生了塑性变形,表现出塑性积累现象,地铁车站结构承担着上盖结构的竖向荷载,竖向变形更加明显,车站中柱发生剪压破坏,破坏形式与大开车站相类似。

(3)强震作用下,上盖一体化地铁车站结构的损伤破坏区域主要是车站各层楼板和墙柱的交接位置,尤其是底层中柱和侧墙底部的损伤最为严重。

(4)单体车站与上盖一体化地铁车站结构地震响应规律存在一定差异,上盖一体化地铁车站结构的地震反应略小,上盖地铁车站结构的地震响应同时受上盖结构和周围土体介质的影响,上盖结构对上盖地铁一体化区域的影响显著,周围土体对上盖地铁非一体化区域的影响显著。

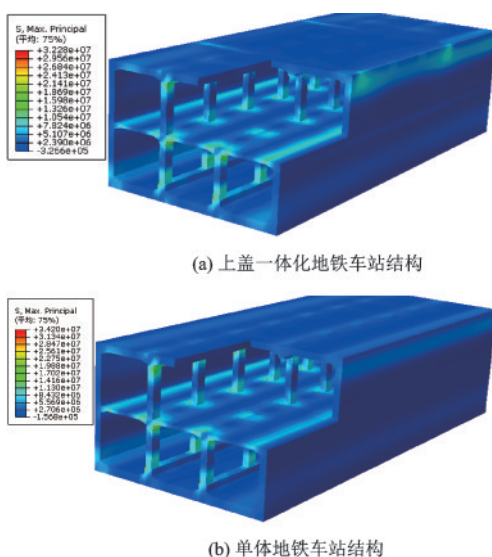


图9 地铁车站结构 Mises 应力云图

Fig.9 Maximum principal stress contour map of station structure

## 参考文献:

- [1] 贾坚. 城市地下综合体设计实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.  
Jia J. Design practice of urban underground complex [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 张天宇, 陈清军. 土-地铁车站及其上盖结构体系地震反应分析[J]. 力学季刊, 2019, 40(3): 504-514.  
Zhang T Y, Chen Q J. Seismic response analysis of earth-metro-metro station and its upper-cover structure system [J]. Mechanics Quarterly, 2019, 40(3): 504-514. (in Chinese)
- [3] 王淮峰, 楼梦麟, 陈希, 等. 邻近地上结构对地下结构动力响应的的影响参数[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1773-1777.  
Wang H F, Lou M L, Chen X, et al. Effect parameters

- of adjacent ground structures on dynamic response of underground structures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(12): 1773-1777. (in Chinese)
- [4] Ptilakis K, Tsiniadis G, Leanza A, et al. Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2014, 67: 1-15.
- [5] 郭靖. 地下结构动力分析及其对地表建筑地震响应的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
Guo J. Dynamic analysis of underground structures and its influence on seismic response of surface buildings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] Robb E S M, Vic C, Steven K. Shake table testing to quantify seismic soil-structure interaction of underground structure [C] // *Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. San Diego: [s.n.], 2010: 1-5.
- [7] Choi J S, Lee J S, Kim J M. Nonlinear earthquake response analysis of 2-D underground structures with soil-structure interaction including separation and sliding at interface [C] // *15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, USA: [s.n.], 2002: 1-8.
- [8] Huo H, Bobet A, Fernández G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai station [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [9] Huo H. Seismic design and analysis of rectangular underground structures [D]. Lafayette: Purdue University, 2005.
- [10] Boulanger R W, Wilson D W, Kutter B L, et al. Nonlinear FEM analyses of soil-pile-interaction in liquefying sand [J]. *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 2004, 126(3): 470-478.
- [11] Kuhlemeyer R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(5): 421-427.
- [12] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [13] 赵密. 粘弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2004.  
Zhao M. A comparative study on the artificial boundary of viscoelasticity and its boundary with transmission [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [14] 尹侯权. 地震波斜入射时成层半空间场地反应分析方法及其应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.  
Yin H Q. Analysis method and application of semi-spatial ground response in formation of seismic wave inclinations [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [16] 谷音, 钟华, 卓卫东. 地震作用下大型地铁车站结构三维动力反应分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2290-2299.  
Gu Y, Zhong H, Zhuo W D. Three-dimensional dynamic response analysis of large subway station structure under earthquake action [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2290-2299. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)