

盾构法施工的车站-通道-出入口建筑物体系的地震响应分析*

袁 勇^{1,2} 黎若寒¹ 陈 鸿³ 李新星³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 200092, 上海;
3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//第一作者, 教授)

摘 要 为了研究盾构法施工的车站及其体系在地震作用下的薄弱环节及最不利位置,建立了车站-通道-出入口建筑物体系的地层-结构三维精细化有限元数值模型,研究了盾构车站-连接通道-出入口建筑物的地震动力响应规律。通过输入沿车站横向和纵向的设防地震动作用时程,重点考虑通道-车站连接段的地震动力响应,研究了结构体系的应力、损伤和变形模式。研究结果表明:车站-通道-出入口建筑物体系的最不利位置为连接通道与车站的连接部位,以及连接通道与出入口建筑物的连接部位;地震纵向输入相比于横向输入更为不利;车站-通道-出入口建筑物体系变形模式主要取决于出入口建筑物与车站之间非一致的变形,车站在横向地震作用下呈现开口处的挤压变形,在纵向地震作用下呈现扭转变形。

关键词 地铁车站; 连接通道; 出入口建筑物; 地震响应

中图分类号 U452; TU452

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.046

Analysis of Shield Method Construction Station-Passage-Entry/Exit Building System Seismic Response

YUAN Yong, LI Ruohan, CHEN Hong, LI Xinxing

Abstract To investigate the weak link and most unfavored position of shield method construction station and the system under seismic motion, a three-dimensional refined finite element numerical model of station-passage-entry/exit Building system is established. The seismic dynamic response law of the system is studied. By inputting the transverse and longitudinal fortification seismic motion time-history and emphatically considering the seismic dynamic response of passage-station section, the stress, damage and deformation patterns of the structural system are investigated. Results show that the most unfavored locations of the station-passage-entry/exit Building system are the connecting part between the passage and the station

as well as that between the passage and the entry/exit building. Seismic motion input is more harmful to the structural system in longitudinal direction than in transverse direction. The deformation pattern of the station-passage-entry/exit Building system is mainly determined by the non-uniform deformation between the entry/exit building and the station. The station exhibits squeeze deformation at the openings under transverse seismic action and torsional deformation under longitudinal seismic action.

Key words metro station; connecting passage; entry/exit building; seismic response

First-author's address Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China

在软土地层采用盾构法建造车站时^[1],需要重点关注车站结构、连接通道及出入口建筑物结构在地震作用下的安全性。

不同于区间盾构隧道,盾构法施工大直径隧道衬砌车站-连接通道-出入口建筑物(以下简称“车站-通道-出入口建筑物”)体系在空间上具有不对称性,且各部分的轴线相互交叉,结构刚度差异显著。在地震作用下,盾构法施工的大直径隧道衬砌局部开洞区域及各部分的连接部位可能会产生应力集中,造成结构的破坏。对此,有必要开展车站-通道-出入口建筑物体系地震安全性研究,分析地震作用下的薄弱环节及最不利位置,总结盾构法施工车站的动力响应规律。

隧道连接刚度变化段的地震响应规律,主要针对对隧道-出入口建筑物以及隧道-联络通道两类体系。文献[2]模拟分析了盾构隧道与端头竖井连接处的管片及接头震害机制及影响因素,发现该连接处接头易发生剪切破坏。文献[3]基于连续多尺度

* 土木工程防灾国家重点实验室课题(SLDRCE19-A-13);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52061135112)

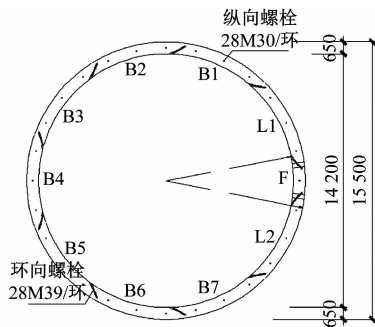
桥域耦合动力分析方法研究了青草沙隧道与竖井连接节点的地震响应,发现隧道与竖井连接处存在较大的应力集中。文献[4]推导了纵向激励下竖井-隧道结构地震响应的解析解,发现竖井在地震作用下的转动一定程度上决定了隧道地震响应的大小。文献[5]通过振动台试验和数值模拟相结合的方式,研究了地铁车站-隧道结构连接的地震响应,发现车站与隧道之间强烈的变形不一致性是导致连接处发生位错破坏的原因。文献[6]采用振动台试验研究了竖井-隧道体系的地震响应,结果表明管片接缝的张开量取决于竖井和隧道之间地震响应的差异。文献[7]通过数值模拟分析了联络通道对盾构隧道抗震性能的影响,认为联络通道的影响范围大致为联络通道两侧各2.5倍通道直径的距离。文献[8]采用数值模拟对隧道与横通道组成的空间交叉结构进行了抗震性能研究,认为隧道与横通道连接部位的顶部是抗震的薄弱部位,需要采取加固措施。文献[9]建立了隧道联络通道地基系统的三维有限元模型,研究了双线隧道联络通道的地震响应,结果表明横向加载时联络通道对隧道的影响比纵向加载时大。文献[10]基于有限差分软件,建立了双线并行隧道及联络通道的三维数值模型,探讨了联络通道直径和长度对连接处地震响应的影响,结果表明联络通道越长越细,对隧道的不利影响越显著。针对连接通道的抗减震设计,一些文献对采用了不同连接方式^[11]、加固地层^[12]、不同接头的刚度^[13]进行了研究。然而,对于更为复杂的车站-通道-出入口建筑物体系的地震响应,还少有研究报道。

本文以上海地区拟建的某盾构法施工车站为研究对象,采用三维有限元建立了车站-通道-出入口建筑物体系的三维数值模型,研究车站-通道-出入口建筑物体系在不同地震输入方向下的地震响应,确定地震作用下的最不利位置,以及不同地震输入方向下车站-通道-出入口建筑物体系的特征变形模式。

1 研究背景

拟建车站采用单层衬砌结构,设计覆土厚度为15 m,盾构衬砌外径为15.5 m,内径为14.2 m,预制管片厚0.650 m。衬砌环分为10块(包括1块封顶块、2块邻接块及8块标准块),其采用通用衬砌环以满足直线段及曲线段施工,以及施工纠偏等需要,见图1。在衬砌管片拼装设计中,封顶块中线与

水平线的夹角分别为 0° 、 141.429° 和 205.716° ,形成错缝衬砌管环。



尺寸单位:mm

注:B为标准块;L为邻接块;F为封顶块。

图1 衬砌管片示意图

Fig.1 Diagram of lining segment

根据建筑布置要求,在车站站厅设连接通道,将车站隧道与出入口附属厅相连,连接通道结构内底面与车站主体结构的隧道轴线的竖向距离为2.3 m。站厅层出入口连接通道尺寸为 $8.0\text{ m} \times 4.5\text{ m}$,长12.6 m。需在隧道的4环衬砌管片上设置开口块,开口处衬砌环改用钢管片。施工时要求将连接通道与车站主隧道钢管片开口的四周间隙填充完整。出入口建筑物尺寸为 32.00 m (平行于车站隧道轴线方向) $\times 16.00\text{ m}$ (垂直于车站隧道轴线方向) $\times 15.22\text{ m}$ (竖向)(结构设计示意图见图2)。

2 数值模型的建立

2.1 模型设计

采用ABAQUS有限元软件建立地层-结构数值计算模型(以下简为“数值模型”)。模型包括地层、车站、连接通道、出入口建筑物,以及各部分间的连接。车站-通道-出入口建筑物结构模型见图3。

2.1.1 场地模型

车站所处土层分层较多,土层性质变化大。如图4所示,地层竖向(y向)共分为17层,其整体尺寸为 $120\text{ m}(x\text{向}) \times 70\text{ m}(y\text{向}) \times 100\text{ m}(z\text{向})$ 。采用SHAKE91软件计算可得每层土体的等效线性化参数^[14],作为地层数值模型中各层的动力参数。

2.1.2 车站结构模型

盾构法施工的车站结构衬砌分为C60混凝土管片和钢管片。在计算模型中,管片混凝土选取塑性损伤本构^[15],弹性模量为36 GPa,泊松比为0.2、体积质量为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 。在前期试算中发现,管片开口影响范围约为8环管片。因此,开口管片两侧各8环管片采用精细化建模,远端管片根据刚度等

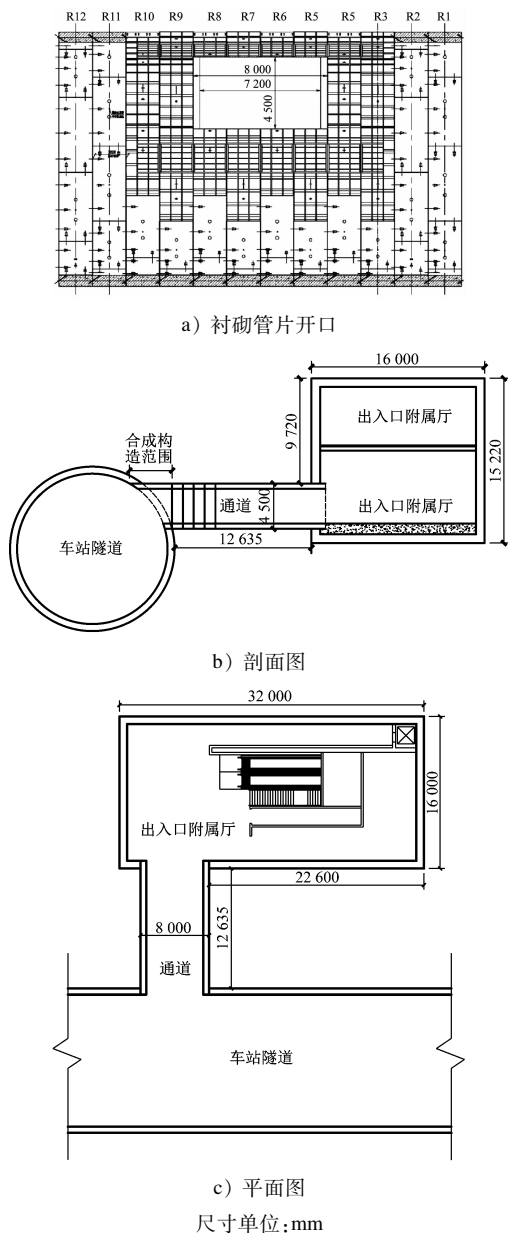


图2 车站-通道-出入口建筑物结构设计示意图

Fig. 2 Diagram of station-passage-entry/exit building structure design

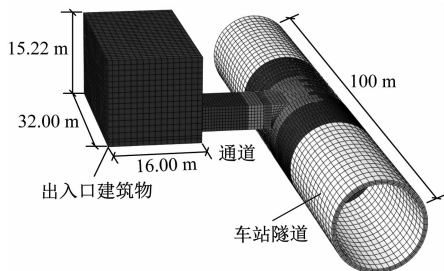


图3 车站-通道-出入口建筑物结构示意图

Fig. 3 Diagram of station-passage-entry/exit building structure

效原则等效为均质管片(如图3所示)。钢管片等

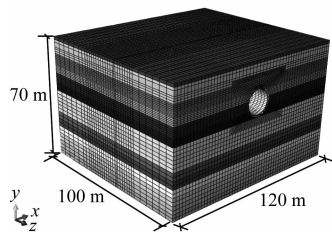


图4 地层模型示意图

Fig. 4 Diagram of stratum model

效为均质等厚管片,钢材采用理想弹塑性本构,弹性模量折减为 80 GPa、泊松比为 0.3、体积质量折减为 6 780 kg/m³;管片间连接螺栓采用线弹性本构模型,弹性模量为 200 GPa、泊松比为 0.3、体积质量为 7 850 kg/m³。

2.1.3 连接通道及竖井模型

连接通道及出入口建筑物结构采用 C60 混凝土。连接通道截面宽度为 8.0 m,高度为 4.5 m,厚度为 0.5 m;出入口建筑物结构长度为 32.00 m,宽度为 16.00 m,高度为 15.22 m,壁厚 0.8 m。由于本研究重点关注车站衬砌结构与连接通道的地震响应规律,故在数值模型中将出入口建筑物结构的材料设置为线弹性。

连接通道与车站连接段由顶管机头切割后内部浇筑混凝土而成,因此,该连接段设置为理想弹塑性本构模型,考虑刚度等效,弹性模量折减为 47 GPa,泊松比为 0.3,体积质量折减为 3 460 kg/m³。

2.2 动力计算的边界设置

地下结构动力计算的数值模型有多种边界。从实用角度来看,等位移边界这类虽构建简单却能反映物理实质的人工边界条件,更便于实际应用。

由此 y 向剪切波传播为:

$$\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中:

$u(x, y, t)$ —— t 时刻质点的位移;

c_s ——剪切波速。

由式(1)可知,介质质点运动与坐标 x 无关,即边界上同一高度的介质质点运动时位移保持一致。设置等位移边界,即约束场地模型两侧相同高度节点的位移量,可模拟 y 向剪切波传播时的侧边界变形,并避免侧边界反射波干扰分析结果。

2.3 接触面设置

在数值模型中,土层-管片衬砌、土层-通道结

构、土层-出入口建筑物结构、管片-管片、管片-螺栓等接触面较多。接触面作用方式主要有以下几种。

1) 嵌入。在数值模型中,螺栓均采用梁单元进行模拟,最终所有螺栓梁均嵌入与之接触的管片模型内部。

2) 摩擦接触。管片间,以及管片与土层间的表面为直接接触,定义为切向摩擦、法向硬接触的接触形式。其中,管片间切向摩擦系数取 0.6,管片与土层间切向摩擦系数取 0.3。

3) 绑定。连接通道与车站连接处,以及连接通道与出入口建筑物连接处的接触面,定义为绑定约束。绑定约束的接触面节点具有完全相同的位移量。

2.4 地震波输入

以地层-结构模型的底面作为地震波输入面,输入不同方向的加速度时程。输入地震波为 50 年超越概率 10% (设防地震) 的上海人工波,其地表加速度峰值为 $0.12g$ (g 为重力加速度),分为 x 向和 z 向输入。上海人工波加速度时程及傅里叶谱见图 5。

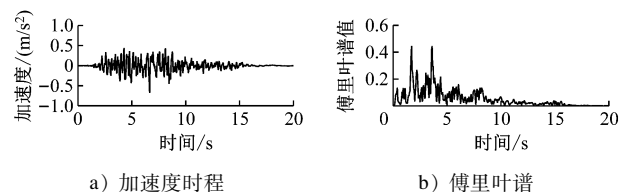


图 5 上海人工波加速度时程及傅里叶谱
Fig. 5 Accelerogram and Fourier spectrum of Shanghai synthetic wave

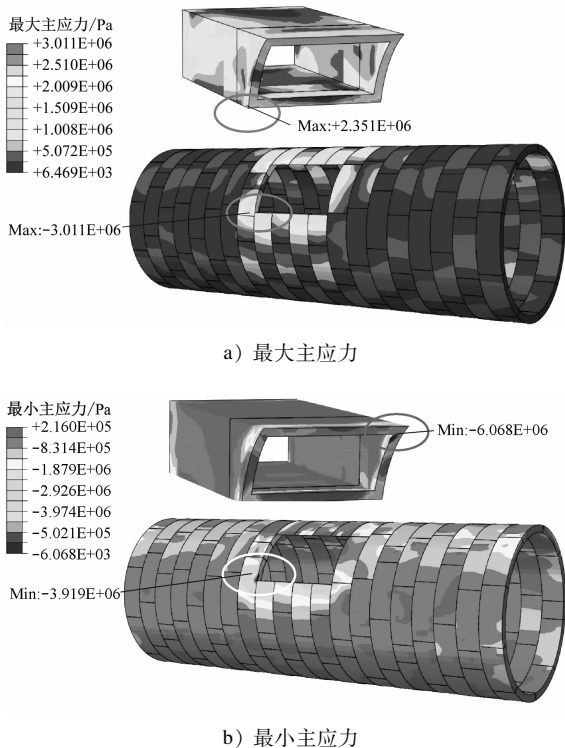
3 计算结果分析

3.1 结构应力

3.1.1 横向地震输入

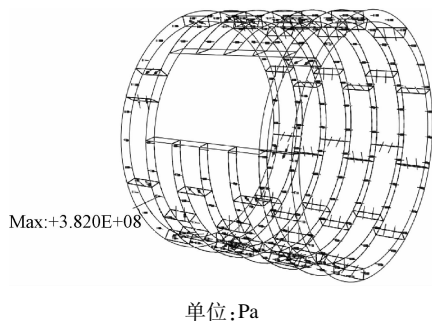
在横向地震输入下,盾构法施工车站结构连接处的主应力云图如图 6 所示。基于最大拉应力理论,如某处最大主应力达到极限值,则认为该处发生破坏。由图 6 a) 可见:车站管片结构最大主应力为 3.01 MPa,位于衬砌开口的底部管片转角处;通道结构最大主应力为 2.35 MPa,位于通道与车站连接部位的底部转角处。由图 6 b) 可见:车站管片结构最小主应力为 -3.92 MPa,位于管片开口的底部转角处;通道最小主应力为 -6.07 MPa,位于通道与车站连接部位的顶部转角处。虽通道结构最大主应力超过了混凝土抗拉强度设计值,但其余部位

未超过材料极限强度,故认为通道仍处于安全阶段。



注:应力以受拉为正,受压为负。
图 6 盾构车站横向地震输入时结构主应力云图
Fig. 6 Nephogram of structure principal stress of shield station under transverse seismic motion input

管片环向螺栓及纵向螺栓的最大拉应力如图 7 所示。由图 7 可以看到,管片开口处下方纵向螺栓的最大拉应力为 382 MPa,小于螺栓极限抗拉强度。故该处螺栓处于安全阶段。



单位:Pa
图 7 横向地震输入时的螺栓最大拉应力
Fig. 7 Maximum tensile stress of bolt under transverse seismic motion input

3.1.2 纵向地震输入

类似地,纵向地震输入下盾构法施工车站的主应力云图如图 8 所示。由图 8 a) 可见:车站管片结构最大主应力为 3.89 MPa,位于衬砌开口的底部转

角处;通道最大主应力为 3.81 MPa,位于通道与车站连接部位的底部对应转角处。由图 8 b)可见,车站结构管片最小主应力为 -7.57 MPa,位于管片开口的底部转角处;通道最小主应力为 -13.45 MPa,位于通道与车站连接部位的底部转角处。通道结构最大主应力超过混凝土抗压强度设计值,而其余部位主应力未超过材料极限强度,仍处于安全阶段。

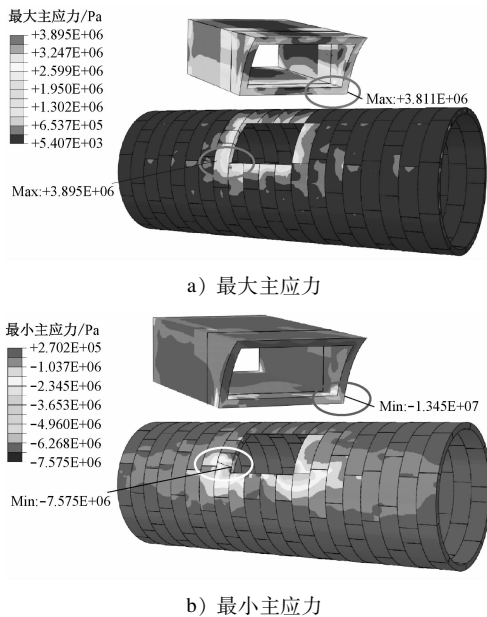


图 8 盾构车站纵向地震输入时结构主应力云图

Fig. 8 Nephogram of structure principal stress of shield station under longitudinal seismic motion input

如图 9 所示,管片开口处右上侧的环向螺栓最大拉应力为 380 MPa,小于螺栓极限抗拉强度。

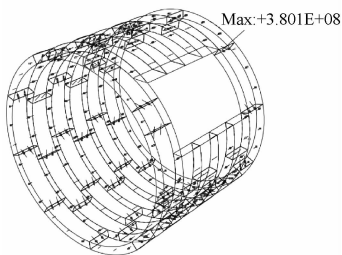


图 9 纵向地震输入下螺栓最大拉应力云图

Fig. 9 Nephogram of maximum tensile stress of bolt under longitudinal seismic motion input

3.2 混凝土损伤

混凝土的损伤因子取值为 0~1,其中 0 代表混凝土没有发生损伤,1 代表混凝土完全破坏。

3.2.1 横向地震输入

横向地震输入下车站结构衬砌管片及通道结

构的混凝土损伤如图 10 所示。通道结构混凝土的受拉损伤因子最大值为 0.963,位于与车站连接部位的转角处,而车站衬砌管片受拉损伤因子最大值仅 0.004,车站和通道结构的混凝土受压损伤因子最大值仅为 0.007。

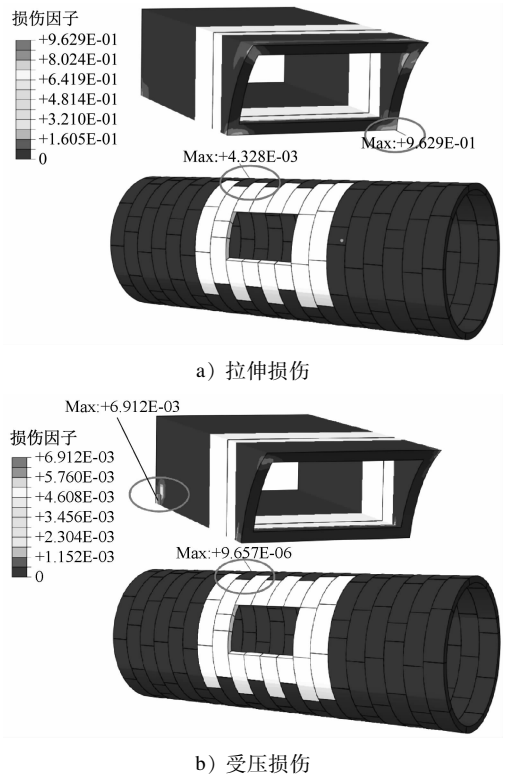


图 10 横向地震输入下的最大损伤云图

Fig. 10 Nephogram of maximum damage under transverse seismic motion input

3.2.2 纵向地震输入

车站结构衬砌管片及通道结构的混凝土最大损伤如图 11 所示。混凝土最大受拉损伤位于通道与车站连接部位的转角处,损伤因子值为 0.977;车站衬砌管片最大受拉损伤因子为 0.113。受压损伤主要分布在连接通道与车站连接部位的转角处,损伤因子最大值为 0.101,而车站管片的受压损伤较小,受压损伤因子最大值为 0.002。

3.3 变形规律

将车站-通道-出入口建筑物体系特征变形放大 3 000 倍,得到变形示意图见图 12。由图 12 可知:

1) 在横向地震作用下,出入口建筑物呈现典型的摇摆变形。由于出入口建筑物与车站运动的不一致,出入口建筑物通过连接通道对车站产生了横向的挤压,使得车站开口处出现较大的挤压变形。

2) 在纵向地震作用下,出入口建筑物由于纵向

较大的变形刚度,没有表现出显著的摇摆变形。由于出入口建筑物与车站运动的不一致,出入口建筑物通过连接通道使车站产生了较大的扭转变形。因此,车站-通道-出入口建筑物体系变形主要取决

于出入口建筑物与车站之间非一致的变形,车站在横向地震作用下呈现挤压变形,在纵向地震作用下呈现扭转变形。

3.4 最不利位置

车站-通道-出入口建筑物体系在不同地震输入方向下的地震响应指标见表 1。

表 1 车站-通道-出入口建筑物体系地震响应汇总

Tab. 1 Summarization of seismic response of station-passage-entry/exit building system

地震相应指标	地震输入方向	指标最大值	指标最值分布位置
最大主应力/ MPa	横向	3.01	管片开口转角处
	纵向	3.89	管片开口转角处
最小主应力/ MPa	横向	-6.07	连接通道与车站连接部位转角处
	纵向	-13.45	连接通道与车站连接部位转角处
受拉损伤因子	横向	0.963	连接通道与车站连接部位转角处
	纵向	0.977	连接通道与车站连接部位转角处
受压损伤因子	横向	0.007	连接通道与出入口建筑物连接部位
	纵向	0.101	连接通道与车站连接部位转角处
螺栓拉应力/ MPa	横向	382	管片开口处下方纵向螺栓
	纵向	380	管片开口处右侧环向螺栓

由表 1 可以发现:车站管片和连接通道的最大应力及最大混凝土损伤均位于连接通道与车站开口处的连接部位;连接通道与出入口建筑物的连接部位在纵向地震输入时也存在较大的混凝土受拉损伤。因此,对于车站-通道-出入口建筑物体系,最不利位置为连接通道与车站的连接部位,以及连接通道与出入口建筑物的连接部位。相比于横向地震输入,纵向地震输入时车站-通道-出入口建筑物体系的应力和损伤更大,因此纵向地震输入相比于横向地震输入更不利。

4 结语

本文以上海地区拟建的某盾构法施工车站结构为研究对象,建立了车站-通道-出入口建筑物体系的三维数值模型,研究了车站-通道-出入口建筑物体系在上海地区设防地震作用下的响应规律,得到了以下结论:

1) 在横向地震作用下:车站-通道-出入口建筑物体系最大主应力为 2.90 MPa,最小主应力为 -6.07 MPa,均位于连接通道与车站开口处的连接部位;最大螺栓拉应力为 382 MPa,位于管片开口处

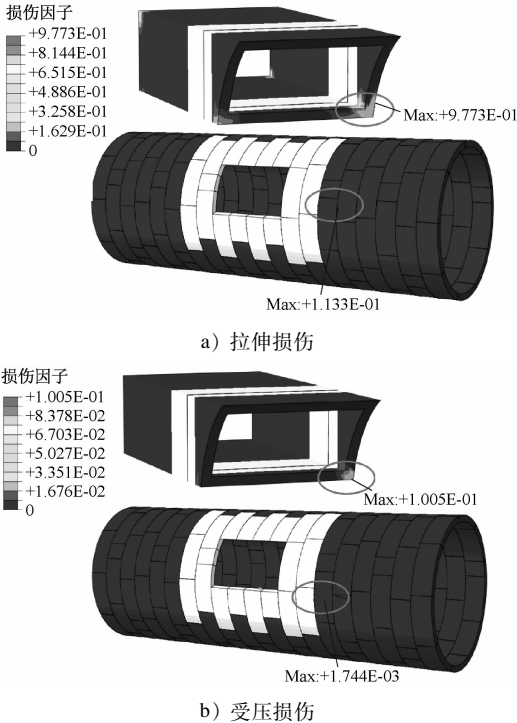


图 11 盾构车站纵向地震输入下的最大损伤云图
Fig. 11 Nephogram of maximum damage of shield station under longitudinal seismic motion input

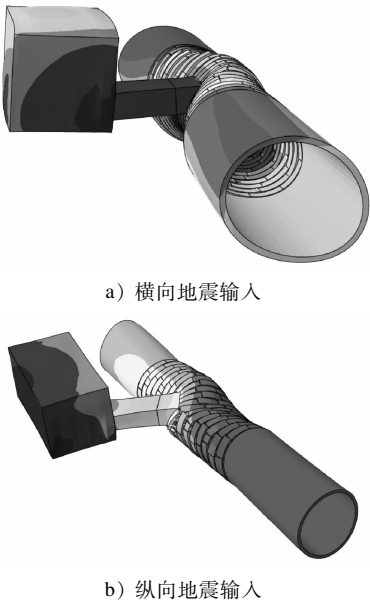


图 12 放大 3 000 倍后的车站-通道-出入口建筑物体系特征变形示意图
Fig. 12 Diagram of station-passage-entry/exit building system characteristic deformation magnified by 3 000 times

下方的纵向螺栓;最大受拉损伤为 0.963,位于连接通道与车站开口处的连接部位;最大受压损伤为 0.007,位于连接通道与出入口建筑物的连接部位。

2) 在纵向地震作用下:车站-通道-出入口建筑物体系最大主应力为 4.17 MPa,最小主应力为 -13.45 MPa,均位于连接通道与车站开口处的连接部位;最大螺栓拉应力为 380 MPa,位于管片开口处右侧的环向螺栓;最大受拉损伤为 0.977,最大受压损伤为 0.101,均位于连接通道与车站开口处的连接部位。

3) 对于车站-通道-出入口建筑物体系,最不利位置为连接通道与车站的连接部位,以及连接通道与出入口建筑物的连接部位。纵向地震输入比横向地震输入更不利。

4) 车站-通道-出入口建筑物体系变形模式主要取决于出入口建筑物与车站之间非一致的变形。车站在横向地震作用下呈现开口处的挤压变形,在纵向地震作用下呈现扭转变形。

参考文献

- [1] 柳献,郭振坤,伍鹏李,等. 通道开口对超大直径盾构法车站结构力学行为影响研究及结构优化[J]. 土木工程学报,2021(7):114.
LIU Xian, GUO Zhenkun, WU Pengli, et al. Study on influence of passage opening on the mechanical behavior of super large diameter shield tunnel station structure and structural optimization [J]. China Civil Engineering Journal, 2021(7): 114.
- [2] 赵武胜,何先志,陈卫忠,等. 盾构隧道与竖井连接处管片及接头震害分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012(增刊2):3847.
ZHAO Wusheng, HE Xianzhi, CHEN Weizhong, et al. Analysis of seismic damage of segments and joints at the junction of shield tunnel and shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(S2): 3847.
- [3] YU H, YUAN Y, QIAO Z, et al. Seismic analysis of a long tunnel based on multi-scale method [J]. Engineering Structures, 2013,49: 572.
- [4] ZHANG J, YUAN Y, BILOTTA E, et al. Analytical solutions for seismic responses of shaft-tunnel junction under longitudinal excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 131:106033.
- [5] CHEN Q, ZHANG T, HONG N, et al. Seismic performance of a subway station-tunnel junction structure: a shaking table investigation and numerical analysis[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021,25(5):1653.
- [6] ZHANG J, YUAN Y, YU H. Shaking table tests on discrepant responses of shaft-tunnel junction in soft soil under transverse excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120:345.

- [7] 张迪,焦齐柱,徐意智,等. 地震作用下盾构隧道横通道对主隧道的影 响分析[J]. 地下空间与工程学报,2014(增刊1):1584.
ZHANG Di, JIAO Qizhu, XU Yizhi, et al. Analysis on influence of cross passage on seismic behavior of the main tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014(S1): 1584.
- [8] 臧万军,高波. 公路隧道与横通道交叉结构抗震性能研究[J]. 北京工业大学学报,2012(4):509.
ZANG Wanjun, GAO Bo. Seismic performance of intersection of highway tunnel and horizontal adit[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012(4): 509.
- [9] 王建伟,金先龙,王新,等. 双线隧道联络通道地震响应的并行数值分析[J]. 上海交通大学学报,2011(10):1557.
WANG Jianwei, JIN Xianlong, WANG Xin, et al. Seismic response analysis of connectional passage in twin-tunnel based on parallel computing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011(10): 1557.
- [10] 郭知一,周海郑,郑刚,等. 隧道与联络通道连接处地震响应分析[J]. 地震工程学报,2021(6):1480.
GUO Zhiyi, ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, et al. Seismic response analysis of the joint between tunnel and cross passage[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021(6): 1480.
- [11] 何悦,何川,耿萍,等. 盾构隧道联络横通道地震响应振动台试验[J]. 中国公路学报,2017(8):193.
HE Yue, HE Chuan, GENG Ping, et al. Shaking table test on seismic response of structure at shield tunnel and transverse passage [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017(8): 193.
- [12] 孔戈,周健,王绍博,等. 盾构隧道联络通道地震响应规律研究[J]. 地震工程与工程振动,2009(3):101.
KONG Ge, ZHOU Jian, WANG Shaobo, et al. Study on seismic response of connectional passage for a shield tunnel[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009(3): 101.
- [13] 丁修恒,文毅然,郑明飞,等. 机械法联络通道-隧道系统地震荷载响应分析[J]. 土木工程学报,2019(增刊2):193.
DING Xiuheng, WEN Yiran, ZHENG Mingfei, et al. Analysis of seismic load response of communication channel-tunnel system constructed by mechanical method[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(S2): 193.
- [14] 齐文浩,薄景山. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程,2007,23(4):221-226.
QI Wenhao, BO Jingshan. Summarization of equivalent linear method of seismic responses for soil layers[J]. World Earthquake Engineering, 2007(4): 221.
- [15] 秦浩,赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J]. 结构工程师,2013(6):27.
QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model[J]. Structural Engineers, 2013(6): 27.

(收稿日期:2021-12-27)