

## 岩石场地群洞地铁车站联络通道地震响应分析\*

袁 勇<sup>1</sup> 李若舟<sup>2</sup> 贺维国<sup>3</sup> 李清菲<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 200092, 上海; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海;  
3. 中铁第六勘察设计院集团有限公司隧道设计分公司, 300308, 天津//第一作者, 教授)

**摘 要** 以某交叠型群洞地铁车站为例, 基于岩石场地, 建立围岩-群洞地铁车站相互作用体系的三维有限元模型, 分析地震作用下车站的薄弱部位, 研究站内联络通道连接处的地震响应。各联络通道连接处的结构横断面和刚度突变, 是地下结构抗震的薄弱部位。研究结果表明: 站厅隧道与站厅-站台联络通道连接处的拱肩、站台-站台联络通道与站台隧道连接处的拱底是抗震的薄弱部位; 站台-站台联络通道 4 的断面 A 处和站厅-站台联络通道的下断面是结构受力的最不利部位; 地震动频谱对隧道连接处内力响应有较大影响。

**关键词** 地铁车站; 地震响应; 联络通道; 交叠型群洞; 岩石场地; 连接部位

**中图分类号** TU435:U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.08.041

## Seismic Response Analysis of Link Passage in Rock Site Tunnel-group Metro Station

YUAN Yong, LI Ruozhou, HE Weiguo, LI Qingfei

**Abstract** Taking certain overlapping tunnel-group metro station as example, a three-dimensional finite element model of the interaction system between the surrounding rock and the tunnel-group metro station is established, focusing on the analysis of the station weak parts under seismic motion and the investigation of seismic response at link passage connecting part in station. The structure lateral section and stiffness sudden change at each link passage connecting part is demonstrating weak performance in underground structure seismic resistance. Results show that the spandrel at the connecting part between the hall tunnel and the hall-platform link passage, and the arch bottom at the connecting part between platform-platform link passage and platform tunnel are the weak part in aseismic performance. The section A of platform-platform link passage 4 and the lower section of hall-platform link passage is the unfavored part of structure bearing force. The ground motion spectrum has a great influence on the internal force response of tunnel connection.

**Key words** metro station; seismic response; link passage; overlapping tunnel-group; rock site; connecting part

**First-author's address** State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China

岩石场地地下工程在岩土体介质的强约束作用下, 其抗震性能明显优于地面建筑物<sup>[1-2]</sup>。然而, 根据国内外震害调查结果, 地震作用依然会导致地下洞室支护结构及围岩的损伤、破坏乃至洞室的完全坍塌。例如, 在 2008 年我国的汶川地震中, 龙溪隧道距震中 49 km, 其洞口处混凝土严重开裂, 衬砌发生错台, 洞室衬砌开裂剥落, 地板最大隆起达 1.2 m<sup>[3]</sup>。地下结构的地震响应主要受周围岩土体变形的控制, 故在结构截面突变部位(如地铁车站与隧道的连接处)容易发生刚度突变, 进而形成较大变形差, 破坏地下结构的安全。在 1995 年日本阪神地震中, 三宫盾构隧道与竖井连接处发生接头结构错位, 造成了盾构隧道管片接头破坏, 导致严重漏水事故<sup>[4]</sup>。可见, 需特别关注地下结构截面刚度突变部位的抗震性能。文献[5]通过振动台试验及数值模拟方法研究了地铁车站与隧道接头的地震响应, 分析了车站结构抗震的薄弱部位以及接头对构件内力的影响。文献[6]建立了弹性、刚性与柔性盾构隧道接头模型, 分析了接头类型、周围土体加固情况及非线性接触面等因素对隧道抗震的影响。文献[7]研究了刚性接头与铰接接头对盾构隧道连接处的抗震影响。目前, 相关研究主要关注盾构隧道与工作井连接处的抗震特性, 较少关注岩石场地地铁车站与联络通道连接处的抗震特性。某交叠型群洞地铁车站采用矿山法建造。本文以该

\* 国家自然科学基金-高铁联合基金项目(U1934210); 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项目(2021YFE0114100); 土木工程防灾国家重点实验室课题(SLDRCE19-A-13)

站为案例车站,建立隧道群围岩-结构三维有限元模型,分析该站站厅-站台联络通道、站厅层、站台-站台联络通道等薄弱部位,以及车站与区间隧道连接处附近的应力分布特征及受力情况。

1 工程背景

案例车站采用站厅与站台分离、且左右站台分离的交叠型群洞结构形式。站厅隧道长 183.2 m,站台隧道长 169.1 m,站厅层双层断面拱顶埋深为 15.2 m。站厅层与站台层由多个斜通道及垂直通道连接,形成群洞空间结构。这种车站结构形式在全国尚属首例。图 1 为该站结构示意图。乘客通过站厅-站台联络通道穿梭于站厅层和站台层之间,并通过站台-站台联络通道进行左右线路的换乘。风道连接站厅和站台,并进行车站内换气。站厅隧道采用双层初支拱盖法施工,即拱部采用环形导坑法开挖,下断面采用台阶法开挖;站台隧道均采用台阶法开挖。车站结构受力复杂。为便于计算,本文将风道简化为站台-站台联络通道。简化后的地铁车站结构侧视图见图 2。站台-站台联络通道和站厅-站台联络通道的具体尺寸见图 3。

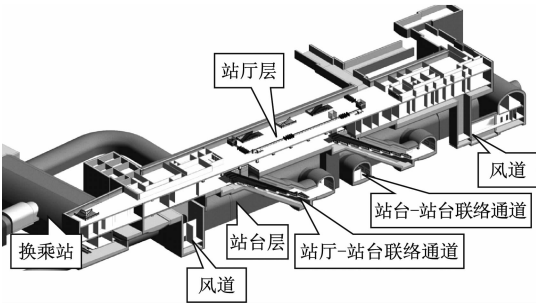


图 1 案例车站结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of case station structure

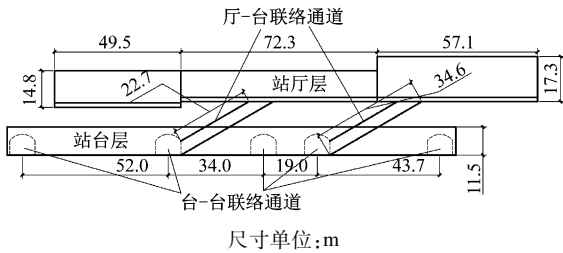
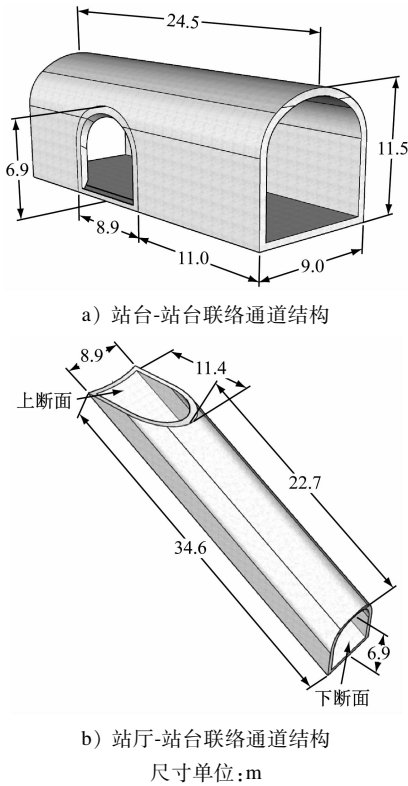


图 2 简化后的车站结构侧视图  
Fig. 2 Side view of simplified station structure

2 动力分析模型

2.1 有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件建立三维车站-围岩有



尺寸单位:m  
图 3 联络通道尺寸示意图  
Fig. 3 Diagram of link passage size

限元模型来分析案例车站的地震响应。参考《城市轨道交通结构抗震设计规范》及文献[8],本文所建模型尺寸为 300 m (横向方向)×400 m (沿车站纵向方向)×70 m (深度方向),如图 4 所示。模型尺寸满足结构与边界距离>3 倍结构宽度的要求。模型中,围岩采用实体单元 C3D8R,衬砌采用壳单元 S4R,网格数量约为 10 万个,车站结构附近网格最大尺寸为 5 m,小于最大波动频率对应波长的 1/8。模型侧向边界采用等位移边界,即在地震动输入方向上绑定边界上等高度对应点的自由度,放松其余方向的自由度。

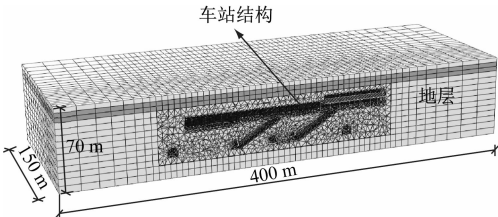


图 4 三维有限元模型中剖面  
Fig. 4 Section in 3D finite element model

2.2 计算参数

2.2.1 结构参数

为了简化计算,将车站结构视为均匀的、连续

的混凝土材料,采用线弹性模型模拟。对于车站结构,除中柱和中板用 C45 混凝土以外,其余部分均使用 C30 混凝土。相关材料参数根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》取值,具体如表 1 所示。隧道结构与周围地层采用 TIE(绑定)连接。

表 1 隧道结构材料参数

Tab.1 Parameters of tunnel structure material			
混凝土等级	弹性模量/GPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比
C30	30	2 500	0.2
C45	33.5	2 550	0.2

2.2.2 场地情况

案例车站大部分覆盖层厚度小于 3.0 m。场地类别为 II 类,其余为基岩。在深度 70 m 范围内的基岩均为花岗岩及花岗斑岩等岩性较好的岩石。根据 GB/T 5021—2014《工程岩体分级标准》,将微风化花岗岩判定为Ⅲ级岩体,将中风化花岗岩判定为Ⅳ级岩体。岩土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型。表 2 为岩土体的物理力学性质参数表。围岩阻尼采用 Rayleigh 阻尼,并取模型前两阶的圆频率来计算阻尼系数。

表 2 岩体物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of rock						
土层	厚度/ m	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹模/ GPa	摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	泊松比
素填土	2	21.0	0.2	16	0.05	0.45
中风化花岗岩	8	23.0	3.0	30	0.60	0.32
微风化花岗岩	60	25.5	11.0	36	1.10	0.28

2.3 输入地震动

采用动力时程分析法进行结构动力响应分析时,考虑设防地震作用,在模型底部横向输入青岛波、集集波和汶川波。设计地震加速度峰值为0.1 g (g 为重力加速度)。调幅和基线校正后的地震波加速度时程曲线见图 5。在计算之前,需先对车站-围岩体系进行初始地应力平衡,得到地层和车站结构的初始应力状态,在此基础上进行动力分析。

3 有限元计算结果分析

3.1 车站内连通道连接处薄弱部位分析

交叠型群洞地铁车站的空间结构形式复杂,其站厅和站台层的结构刚度较大,站厅-站台联络通道及站台-站台联络通道刚度较小,在连接部位存在截

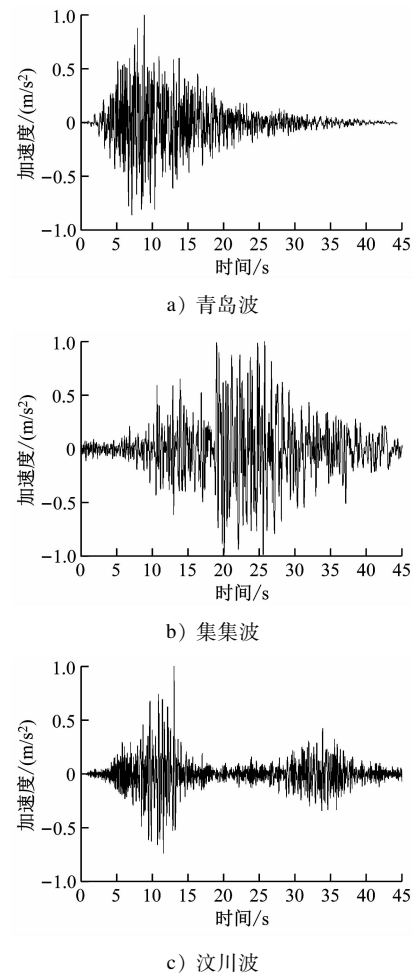


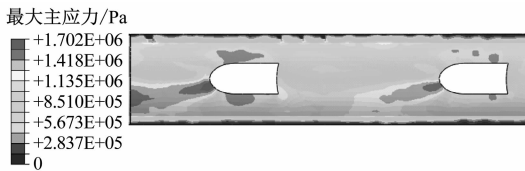
图 5 地震动加速度时程曲线  
Fig.5 Seismic motion acceleration time-history curve

面形式突变和结构刚度突变的问题。因此,需在分析地震响应时特别关注各连接部位是否安全可靠。图 6 为站厅层拱底和站台-站台联络通道的最大主应力分布。由图 6 可见,站厅隧道与站厅-站台联络通道连接处的拱肩部位出现较大的拉应力,站台-站台联络通道与站台隧道连接处的拱底部位也出现较大拉应力。经分析,由于车站与联络通道为刚性连接,因此,在地震动作用下,车站与联络通道之间的相对位移会使其连接处产生较大的拉应力,进而导致混凝土开裂,甚至破坏。

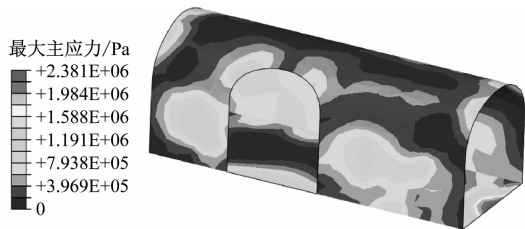
3.2 站台-站台联络通道的动力响应

图 7 为站台-站台联络通道的平面分布示意图。图 7 中,断面 A 和断面 B 为联络通道与站台隧道的连接面。站台-站台联络通道的动力响应主要为连接部位的纵向弯矩、纵向轴力和环向剪力,弯矩与轴力对应于结构的轴线方向,剪力对应于结构的环向。与站台-站台联络通道类似,站厅-站台联络通

道上下断面的动力响应主要研究内容也为纵向弯矩、轴力及环向剪力。



a) 站厅层拱底最大主应力分布



b) 站台-站台联络通道最大主应力分布

图6 结构最大主应力分布云图

Fig. 6 Nephogram of structure maximum principal stress distribution

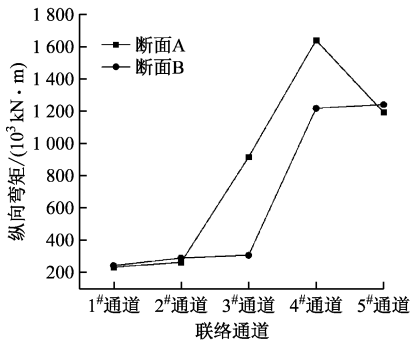


注:1#—4#通道为站台-站台联络通道;斜通道1及斜通道2为站厅-站台联络通道。

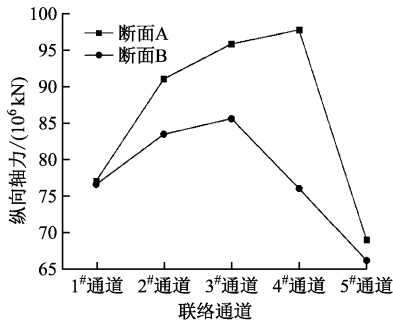
图7 联络通道平面分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of link passage planar distribution

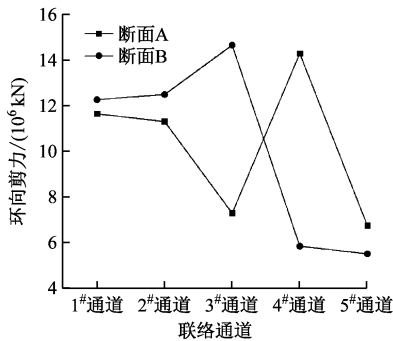
在模型底部输入青岛波,站台-站台联络通道的断面A和B的内力峰值变化见图8。如图8 a)所示:4#通道断面A处的纵向弯矩峰值最大;断面A处的4#通道纵向弯矩峰值比断面B处的大35%,断面A处的3#通道弯矩峰值比断面B处的大198%;其他3个通道断面A与断面B的弯矩峰值较为接近。从图8 b)可以看出:纵向轴力峰值最大值出现在4#通道的断面A;4#通道的断面A处轴力峰值比断面B处轴力峰值大29%。从图8 c)可以发现:3#通道断面B处的环向剪力峰值最大;断面B处的剪力峰值较断面A处的大101%,而4#通道断面A处弯矩峰值比断面B处弯矩峰值大144%。综上所述,对于同一地震波工况下的同一联络通道,断面A处的内力峰值基本大于断面B处的内力峰值;站台-站台联络通道4的断面A处是结构受力的最不利部位。



a) 纵向弯矩峰值



b) 纵向轴力峰值



c) 环向剪力峰值

图8 青岛波对站台-站台联络通道连接处内力峰值的影响  
Fig. 8 Effect of Qingdao wave on the peak value of internal force at platform-platform link passage connecting part

### 3.3 站厅-站台联络通道的动力响应

地震动特性是影响土地地震反应的重要因素。在不同振幅的地震动作用下,地层会出现剪切应变,并发生塑性区分布的变化,进而影响地下结构的地震响应;在不同地震动频谱作用下,场地对地震动有不同的放大效应,对结构的作用也不同。

本文选取了3种主频不同的地震动输入,分析地震动特性对站厅-站台联络通道连接处上下断面(见图3)的内力影响。分析结果见图9。经分析,上断面的内力峰值均小于下断面内力峰值。这说明连接部位下断面处是结构受力的较不利位置。当输入不同特性的地震动时,同一个断面的内力峰

值分布具有一定的规律性。从图 9 a) 中可以发现,就弯矩峰值而言,青岛波的最大,比集集波的大了 8%~16%,比汶川波的大了 4%~28%。图 9 b) 及图 9 c) 中青岛波造成的内力峰值也具有类似的变化规律。这是因为青岛波的主频更接近于场地的基频。

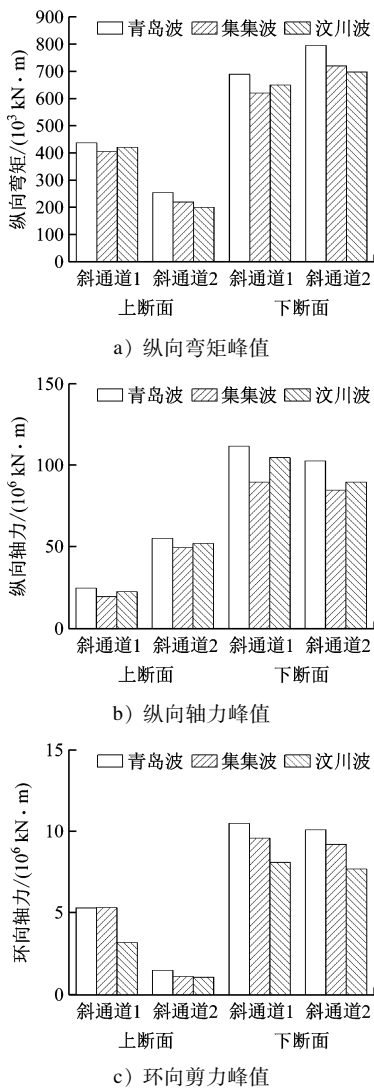


图 9 地震动频谱对站厅-站台联络通道连接处内力的影响  
Fig.9 Effect of seismic motion spectrum on internal force at hall-platform link passage connecting part

## 4 结论

1) 在地震动作用下,站厅隧道与站厅-站台联络通道连接处的拱肩部位会出现较大的拉应力,站台-站台联络通道与站台隧道连接处的拱底部位也会出现较大拉应力。这些部位是连接处抗震的薄弱环节,需要重点关注。

2) 在同一地震动作用下,站台-站台联络通道的内力峰值,断面 A 处基本大于断面 B 处。4#通道的断面 A 处是结构受力的较不利部位,易发生混凝土开裂,甚至进一步破坏。

3) 当输入不同特性的地震动时,站厅-站台联络通道同一个断面的内力峰值具有一定的规律性。青岛波造成的结构内力最大。站厅-站台联络通道连接部位下断面处是结构受力的最不利位置。

## 参考文献

- [1] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001,16: 247.
- [2] MOHAMMAD C P, YAREEVAND A. 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005,20:411.
- [3] 崔光耀,王明年,林国进,等. 汶川地震区典型公路隧道衬砌震害类型统计分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011(1): 122.  
CUI Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, et al. Statistical analysis of earthquake damage types of typical highway tunnel lining structure in Wenchuan seismic disastrous area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011(1): 122.
- [4] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(S): 283.
- [5] 杨林德,王国波,郑永来,等. 地铁车站接头结构振动台模型试验及地震响应的三维数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007(12):1892.  
YANG Linde, WANG Guobo, ZHENG Yonglai, et al. Shaking table tests on subway station joint structure and 3D numerical simulation of seismic response[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(12):1892.
- [6] 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.
- [7] 徐建平,周健,孔戈. 接头形式对联络通道抗震性能影响的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008(2):57.  
XU Jianping, ZHOU Jian, KONG Ge. Study on the influence of the type of joints on seismic behavior of connectional passages[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008(2):57.
- [8] 袁勇,王祺,蔡雪松. 深厚软土地道路隧道结构横向地震响应分析[J]. 中国市政工程, 2020(5):79.  
YUAN Yong, WANG Qi, CAI Xuesong. Analysis of transverse seismic response of road tunnel structure in deep soft soil site[J]. China Municipal Engineering, 2020(5):79.

(收稿日期:2022-01-18)