张文彬,周海祚,郑刚,等.地铁车站与隧道连接处地震响应分析[J].地震工程学报,2021,43(2):438-444.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2021.02.438

ZHANG Wenbin, ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, et al. Seismic Response Analysis of Connection between Metro Station and Tunnel[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 438-444. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.438

地铁车站与隧道连接处地震响应分析

张文彬^{1,2},周海祚^{1,2},郑 刚^{1,2},杨鹏博^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:结构截面刚度突变处是地下结构抗震的薄弱部位,为研究地铁车站与隧道连接处的地震响 应,本文建立有限差分数值模型,分析地震作用下车站与隧道连接处的薄弱部位、连接处附近的侧 墙变形分布特征以及地表沉降分布特征,重点探究埋深、地震动特征以及周围土体刚度对连接处隧 道应力的影响。结果表明:连接处端墙底部跨中、端墙洞口的顶部和底部是抗震的薄弱部位;连接 处端墙存在对侧墙变形分布、地表沉降分布有一定影响;结构埋深,地震动频谱、幅值对连接处隧道 应力响应有较大影响,结构周围土体的刚度在一定范围内对连接处隧道应力有较大影响。 关键词:地铁车站;隧道;连接部位;地震响应

 中图分类号:
 U291.69
 文献标志码:A
 文章编号:
 1000-0844(2021)02-0438-07

 DOI:
 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.438
 0

Seismic Response Analysis of Connection between Metro Station and Tunnel

ZHANG Wenbin^{1,2}, ZHOU Haizuo^{1,2}, ZHENG Gang^{1,2}, YANG Pengbo^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: The section in underground structures with varying stiffness is the vulnerable location in seismic analysis. A finite difference method is adopted to study the seismic response of the connection between the station and the tunnel. The response of the connection of the station and tunnel, the deformation distribution of side wall around the connection, and the ground settlement distribution characteristics are analyzed. The influences of buried depth, ground motion characteristics, and stiffness of surrounding soil on the tunnel stress at the connection are particularly investigated. Results show that the middle part at the bottom of the end wall and the top and bottom parts of the end wall at the connection are sensitive to earthquakes. The presence of the end wall influences the deformation distribution of the side walls and ground settlement. The buried depth of the structures, seismic spectrum, and acceleration amplitude significantly affect the seismic response of the connecting tunnel. Additionally, the stiffness of soil around the metro station

收稿日期:2018-07-20

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0805407);天津市科技计划项目(16YDLJSF00040);国家自然科学基金重点项目(41630641; 51708405)

第一作者简介:张文彬(1994-),男,博士研究生,从事土力学及岩土地震工程方面研究工作。E-mail:zhangwb0125@tju.edu.cn。 通信作者:周海祚(1987-),男,博士,主要从事结构与土相互作用方面的研究。E-mail:zhzrobby@163.com。

has an apparent effect on the stress distribution in the tunnel.

Keywords: metro station; tunnel; connection part; seismic response

0 引言

随着城市建设的进行和人口的增加,传统的交 通方式已经无法满足人们出行的需求。因此地铁作 为一种快捷交通方式,在经济规模和人口规模较大 的城市得到迅速发展。传统观点认为地下结构由于 周围土体的约束作用,在地震中受到的惯性力影响 不大,受到地震作用的破坏较小,而1995年阪神地 震中的地下结构震害现象打破了这一观点:在阪神 地震中,神户高速铁道大开车站,长田站以及它们之 间的连接隧道,神户市营铁道的三宫站、上泽站、新 长田站等车站以及相邻隧道发生了不同程度的破 坏^[1],其中大开车站更是完全损毁。此后,在1999 年台湾集集地震、1999年土耳其科贾埃利地震以及 2008 年汶川地震中,都出现了地下结构发生震害的 报道[2]。由于地下结构的地震响应主要由周围土体 的变形所控制,因此在结构的截面突变部位(如地铁 车站与隧道的连接处)容易发生刚度突变而导致的 较大变形差,威胁地下结构的安全。在1985年墨西 哥地震中,下水道盾构隧道与工作井连接处隧道管 片发生相对错动,环间螺栓被剪断[3];在1995年阪 神地震中,NTT 三宫盾构隧道与竖井连接处发生了 接头结构错位,引起了管片接头破坏,发生了严重漏 水事故[1]。因此对地下结构截面刚度突变部位的抗 震性能需要加以特别关注。先行者们已经取得了许 多研究成果:杨林德、王国波等[4,5] 通过振动台试验 及数值模拟手段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。陈国兴、庄海洋等[6]通过模型试 验分析了软土中地铁车站的动力响应,发现中柱应 变较大,且地下结构响应受地震波频谱特征影响。 周海祚等[7] 通过数值模拟的手段研究了天津典型粉 质黏土中地铁车站与隧道连接处的抗震薄弱区,并 分析了地连墙及回填土对车站侧移的影响。赵武胜 等[8]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、是否考虑周围土体加固以及接触面 非线性等因素对隧道抗震的影响。徐建平等[9]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,结果表明铰接接头使应力重分布,有利于连接处 抗震。现有对车站隧道连接处的研究主要关注接头 处地铁车站的抗震特性,而对隧道的关注并不多,本

文分析地震作用下车站与隧道连接处的薄弱部位、 连接处附近的侧墙变形分布特征以及地表沉降分布 特征,重点探究埋深、地震动特征以及周围土体刚度 对连接处隧道应力的影响。

1 数值模型

1.1 模型尺寸及网格划分

本文采用了有限差分法程序 FLAC3D 分析,以 典型两层三跨地铁车站结构与隧道连接处为研究对 象,整体模型及车站典型剖面如图 1 和 2 所示。其 中计算选取车站结构的长度为 30 m,选取的盾构隧 道结构长度为 30 m,模型宽度为 150 m,车站底板 距基岩高度为 45 m,结构宽度方向为 X 方向,长度 方向为 Y 方向,高度方向为 Z 方向。土体模型和地 铁车站与隧道连接处结构模型分别如图 2,3 所示。 根据 Kuhlemeyer 等^[10]的研究,为了精确描述模型 中波的传播,模型最大网格尺寸满足小于输入最短 波长的 1/8~1/10 的条件。







1.2 本构参数及阻尼选取

本文分析中结构采用弹性模型来描述地震作用 下地下结构的力学特性,其中弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.2,密度为 2 500 kg/m³;由于摩尔库伦 模型具有模型参数简单、物理概念清晰等优点,因此 在地下结构抗震分析中得到了广泛运用^[11-13]。本文 采用摩尔库伦模型来模拟土体的力学特性,为简化 模型以总结规律,研究中采用均质土层,土体参数如 表1所列。

计算中使用了FLAC3D中的局部阻尼^[14],其

| ▲ ⊥ ⊥ 件 侠 坣 釸 奴 | 表 1 | 土体模型参数 |
|-----------------|-----|--------|
|-----------------|-----|--------|

| Table 1 Soil model parameters | | | | | | |
|---------------------------------|-----|---------|----------|--------------------------|--|--|
| 弹性模量 E/MPa | 泊松比 | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 密度/(kg•m ⁻³) | | |
| 60 | 0.4 | 30 | 20 | 1 980 | | |

通过在振动循环中在节点上增加或者减小质量,由 于增加的质量和减小的质量相同,因此整个系统质 量守恒。

当节点速度符号改变时,质量增加,当速度达到 最大值或者最小值时,质量减少。因此损失的能量 ΔW 是最大瞬时应变能 W 的一定比例(ΔW/W),此 比例是率无关和加载频率无关的。ΔW/W 是临界 阻尼比 D 的函数:

$$\alpha_{\rm L} = \pi D$$

式中:α_L为局部阻尼系数,D为临界阻尼比,本文中 阻尼比选取为5%,因此局部阻尼系数设置为0.157 1(=0.05π)。

1.3 边界条件及地震荷载

本文中地应力平衡静力计算中采用了底部固定,模型四周分别约束对应水平位移,上表面完全自由的边界条件;在动力分析计算中采用了底部黏性边界,模型四周设置为自由场边界,防止了边界上波的反射,达到了与无限场地相同的效果。

考虑到地下结构在使用过程中可能遭遇到近 场,中远场和远场的地震动作用,本文计算中考虑了 三种地震动的作用,分别以 Kobe 波,El-Centro 波 以及天津波代表远近不同的地震对地下结构抗震的 影响,垂直于结构轴线方向(X 方向)振动,加速度 峰值调幅为 0.1g 的地震动反应谱如图 4 所示(阻尼 比5%)。动力分析前首先进行了地应力平衡以生 成初始地应力场,完成后水平向进行地震激励进行 动力分析。



图 4 三种地震动的反应谱曲线

Fig.4 Response spectrum of the ground motion records

2 连接处地震响应分析

2.1 车站与隧道连接处薄弱部位分析

动力分析完成后,分析了地铁车站与隧道连接 处的应力云图,如图5所示。图中表明:连接处端墙 (下文简称为端墙)底部跨中出现较大拉应力,隧道 洞口下方端墙出现较大压应力,端墙底部出现波浪 形变形,这是由于端墙开洞使上部顶板承受的重力 荷载由隧道洞口两侧及洞口中间传递至底板、结构 下方土体,导致出现端墙上述应力分布模式和变形 模式。地铁车站与隧道连接端墙的底板、隧道洞口 是连接处抗震的薄弱部位,需要重点关注。在车站 结构中,中柱底部出现了较大压应力,且距离端墙越 近,压应力越小,与以往对车站结构的研究中结论一 致^[5,7]。



图 5 端墙变形及 X 向主应力分布(变形放大 50 倍) Fig.5 End wall deformation and principal stress distribution in the X direction (Deformation amplified by 50 times)



图 6 车站结构最大主应力分布 Fig.6 Maximum principal stress distribution of structure

2.2 侧墙变形与距端墙距离的关系

结构埋深为 10 m,输入峰值加速度为 0.1g 的 天津波情况下,距端墙距离(S)不同处侧墙在地震 过程中最大的相对侧移分布如图 7 所示。从图中可







以看出,连接处端墙的存在对车站结构侧墙位移有 较大影响,距离端墙越近,相对位移越小。

2.3 地表沉降与距端墙距离的关系

图 8 是结构埋深 10 m 距端墙不同距离(S)的 地表在峰值加速度为 0.1g 的天津波作用过程下最 大沉降分布。其中横坐标表示距结构对称轴的距 离,纵坐标表示沉降。不同曲线代表距端墙不同距 离剖面的地表沉降,其中距离为正表示向隧道侧,距 离为负表示向车站结构侧。从图中可以看出:端墙 的存在,限制了地面的沉降,使端墙处土体沉降呈现 两边大,中间小的趋势,整体沉降曲线呈上凸形;远 离端墙的剖面,结构对称轴附近沉降大于两侧沉降, 沉降曲线形状呈下凹形。



图 8 与端墙距离不同的剖面的地表沉降分布 Fig.8 Surface subsidence distribution of sections with different distance from end wall

3 临近连接处隧道应力影响因素分析

由上述分析可知,临近连接处对隧道应力分布 影响较大,因此本节重点分析了距车站与隧道连接 处的距离对隧道应力的影响。如图 9 所示,以距离 连接处 0.5 m 以及 15 m 的隧道分别代表受到连接 处刚度突变影响隧道(临近连接处)和不受连接处刚



图 9 选取隧道截面位置示意图 Fig.9 The position of selected tunnel section

度突变影响的隧道(远离连接处)。由于盾构隧道由 管片拼装而成,在受拉时管片间可能发生张开、错台 等破坏,较为危险,因此下文仅分析隧道在整个地震 作用过程中最大拉应力分布情况。

隧道在 0.1g 的天津波作用过程中的不同位置 处的最大拉应力如图 7 所示。从图中可以看出,临 近连接处的隧道的最大拉应力约为 2.3 MPa,约为 远离连接处隧道最大拉应力的 4 倍;临近连接处的 最大拉应力出现在隧道的顶部和底部。埋深、地震 动频谱、地震动大小、结构周围土体刚度等因素对地 下结构抗震有重要影响,下面分析了这些因素对临 近连接处隧道(下文将临近连接处隧道简称为连接 处隧道)的最大拉内力的影响。



图 10 距连接处不同距离处的隧道最大拉应力 Fig.10 Maximum tensile stress of tunnels at different

distances from the junction

3.1 埋深对连接处隧道应力的影响

选取了三种不同车站结构埋深(5 m,10 m, 20 m)用于研究埋深对连接处反应的影响,研究中 选取了峰值加速度为 0.1g 的天津波作为输入地震 动。图 11 是分析结果,表明随着埋深增加,连接处 隧道的最大拉应力增大。

3.2 地震动特性对连接处隧道应力的影响

地震动特性是影响土体地震反应的重要因素, 地下结构的震害很大程度上与土体的地震反应密切 相关^[3]。在不同幅值的地震动作用下,土体会出现 不同剪切应变大小以及不同塑性区分布,对地下结 构反应造成影响;而在不同频谱作用下,自振周期一 定的土体由于共振效应,反应有所不同。本文选取 了三种主频率成分不同的地震动以及三种不同加速 度幅值地震动输入,结构埋深均为 10 m,研究了地 震 动特性对连接处隧道内力的影响。图12,图13



图 11 埋深对连接处隧道最大拉应力影响 Fig.11 Effect of embedded depth on maximum tensile stress of connecting tunnel



图 12 加速度峰值对连接处隧道最大拉应力的影响 Fig.12 Effect of peak acceleration on maximum tensile stress of connecting tunnel



图 13 地震动频谱对连接处隧道最大拉应力的影响 Fig.13 Effect of earthquake spectrum on maximum tensile stress of connecting tunnel

443

分别是不同频谱或幅值的地震动作用下,连接处隧 道的内力分布:图 12 表明基底输入加速度峰值 (PBA)越大,连接处的最大主应力越大,并且随着地 震动峰值加速度的增加,隧道最大内力分布位置发 生改变,由隧道底部变为底部向逆时针旋转 45 度 处。从图 13 中可以看出,地震动频谱特征对隧道内 力影响很大,在本文的土体、结构刚度条件下,天津 波所造成的隧道应力反应最大。

3.3 车站结构周围土体刚度对连接处隧道应力的 影响

在实际工程中,车站结构施工时周围土体会经 历开挖、回填、加固等过程,车站周围土体的刚度会 受到影响,在1995年阪神地震大开车站的震害分析 中,周围回填土刚度不足可能是大开车站震害严重 的原因之一^[7]。下面分析了不同车站结构周围土体 刚度对连接处隧道内力的影响。刚度变化影响范围 如图 14 所示。该范围内的土体刚度为 *E*_{s1},其他土 体刚度 *E*_{s0}的,刚度比 *R*_s 定义为:



Fig.14 Soil range with varying stiffness

本文计算了刚度比 R_s为 0.1,1,2,4,5,8,10 的 情况,图 15 中横轴为刚度比,纵轴为连接处隧道最 大拉应力,可以看出随着刚度比增加,连接处隧道最 大拉应力有降低的趋势,表明结构周围土体加固有 利于降低连接处隧道的内力,刚度比到 5 以后,对隧 道应力的影响趋于稳定,此时再增大周围土体刚度 对减小连接处隧道的应力贡献不大。

4 结论

本文研究地铁车站与隧道连接处的地震响应并 分析地震作用下车站与隧道连接处的薄弱部位、连 接处附近的侧墙变形分布特征以及地表沉降分布特 征,重点探究了埋深、地震动特征以及周围土体刚度 对连接处隧道应力的影响,得到以下结论:

(1) 连接处端墙底板跨中出现较大拉应力,在

隧道洞口下方的底板中出现较大压应力;连接处隧 道的较大拉应力出现在洞口的顶部和底部,这些部 位是连接处抗震的薄弱环节,需要被重点关注。



Fig.15 Effect of stiffness ratio on maximum tensile stress of connecting tunnel

(2)由于端墙的约束作用,其对临近侧墙的变 形以及地表沉降的空间分布有一定影响:距离端墙 越近,侧墙变形越小。在端墙处剖面地表沉降呈中 间小,两侧大,而在远离端墙剖面的地表沉降则呈中 间大,两侧小。

(3)在地震过程中临近连接处隧道最大应力大 于远离连接处隧道应力,且连接处隧道最大应力随 埋深增大而增大。加速度峰值增大,连接处隧道最 大应力增大且最大应力分布位置由底部变为底部向 逆时针旋转45度处,地震动频谱对连接处隧道内力 影响很大。本文所考虑的土体、结构刚度等情况下, 天津波所造成的隧道应力反应最大。车站结构周围 土体刚度增加有利于减小连接处隧道最大拉应力, 刚度比到达5以后再增大土体刚度对减小隧道应力 贡献不大。

参考文献(References)

- [1] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai Subway Station[J]. Soils and Foundations, 1996, 36 (Special): 283-300.
- [2] 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 Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, 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.

[3] 小泉淳.盾构隧道的抗震研究及算例[M].中国建筑工业出版 社,2009.

ATSUSHI KOIZUMI. Seismic research and numerical examples of Shieldtunnel[M].Beijing:China Architecture& Building Press,2009.

[4] 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,2007,29 (12):1892-1898.

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, 29(12):1892-1898.

[5] 王国波,马险峰,杨林德.软土地铁车站结构及隧道的三维地震 响应分析[J].岩土力学,2009,30(8):2523-2528.

WANG Guobo, MA Xianfeng, YANG Linde. Three-dimensional Seismic Response Analysis of Metro Station Structures and Tunnels in Soft Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2523-2528.

[6] 陈国兴,庄海洋,杜修力,等.土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2007,27
 (2):171-176.

CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang, DU Xiuli, et al. Analysis of Large-scale Shaking Table Test of Dynamic Soil-subway Station Interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(2):171-176.

 [7] 周海祚,郑刚,李笑穹,等.软土地铁结构非线性地震反应分析
 [J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(4): 361-368.

ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, LI Xiaoqiong, et al. Nonlinear Seismic Responses Analysis of Subway Structure in Soft Soil [J].Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016,49(4):361-368.

[8] 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,2012,31(S2):3847-3854.

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, 31(S2); 3847-3854.

- [9] 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,2008,30(2):57-61,47.
 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, 2008,30(2):57-61,47.
- [10] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1973, 99(5):421-427.
- [11] AZADI M, MIR MOHAMMAD HOSSEINI S M. Analyses of the Effect of Seismic Behavior of Shallow Tunnels in Liquefiable Grounds[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5):543-552.
- [12] ABUHAJAR O.EL NAGGAR H.NEWSON T.Experimental and Numerical Investigations of the Effect of Buried Box Culverts on Earthquake Excitation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79:130-148.
- [13] RABETI MOGHADAM M, BAZIAR M H. Seismic Ground Motion Amplification Pattern Induced by a Subway Tunnel: Shaking Table Testing and Numerical Simulation[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83:81-97.
- [14] ITASCA CONSULTING GROUP.FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions; Ver.5.0 User's Guide. Minneapolis:Itasca;2012.