

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.04.15

软土矩形地铁隧道地震反应特性分析

李永靖, 马启郁, 张淑坤, 潘 铖, 张鸿达

(辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究在不同类型的软土地层条件下地铁隧道的地震反应特性, 本文选用 El-Centro 波作为隧道基岩处水平输入的地震波, 利用大型有限元软件 ANSYS 分析上海矩形地铁隧道在三种典型场地中的地震反应特性, 获得了矩形隧道在三种场地中的地震反应规律, 结果表明: 处于软土地层中的矩形地铁隧道, 应力的抗震薄弱位置在衬砌形状突变处, 水平位移的抗震薄弱位置在隧道顶部, 水平加速度的抗震薄弱位置在隧道底部, 设计时应加强薄弱部位的抗震设防, 这为矩形地铁隧道抗震设计提供了参考依据。

关键词: 软土; 矩形地铁隧道; 地震反应特性; 抗震性能

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)04-0104-04

Analysis on seismic response characteristics of rectangular subway tunnels in soft soil

LI Yongjing, MA Qiyu, ZHANG Shukun, PAN Cheng, ZHANG Hongda

(Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to research the seismic response characteristics of subway tunnels in different types of soft soil stratum, El-Centro wave is selected as the horizontal input seismic wave at the bedrock of the tunnel. The seismic response characteristics of Shanghai rectangular subway tunnel in three typical sites are analyzed by ANSYS and the seismic response laws of rectangular tunnel are obtained. The result shows that for the rectangular subway tunnel in soft stratum, the weakest position of the stress is at the sudden change of the lining shape, the weakest position of the horizontal displacement is at the top of the tunnel, and the weakest position of the horizontal acceleration is at the bottom of the tunnel. Therefore, weak parts should be strengthened in design and which provides a reference for the anti-seismic design of rectangular subway tunnel.

Keywords: soft soil; rectangular subway tunnel; characteristic of seismic response; seismic behavior

0 引言

人们对地下建筑结构的抗震理论及设计研究起源于 20 世纪中期, 特别是在多震国家的日本, 几次大地震都使地铁及隧道结构发生了严重震害, 引起了人们对地下隧道结构抗震的关注和重视^[1]。日本学者大森房吉在 20 世纪 50 年代提出了以静力理论为基础来

计算地下结构的地震作用力; 20 世纪 70 年代, 日本学者确立了三种实用抗震分析方法^[2]; 20 世纪 80 年代末期, WOLF 和 SONG 对 DASGUPTA 提出的衍生方法加以改进^[3], 为求解地下结构抗震中的地基动力阻抗矩阵提供了新思路。国内学者朱合华等^[4]分别用样条有限元法和半解析有限元法探究了隧道结构最大内力及其出现位置; 李向辉^[5]、梁剑^[6]进行了地铁抗震

收稿日期: 2018-09-23; 修订日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504125; 51774173; 51704143)

第一作者: 李永靖(1976-), 男, 山东烟台人, 土木工程专业, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程方面的教学和科研工作。E-mail: Lyjsdyt@126.com

设计方面的研究;姜忻良等^[7]、蔡海兵等^[8]、孔戈等^[9]从不同角度进行了隧道地震反应特性的分析。以上专家学者的研究均取得了有益成果,但是,以上研究的地铁隧道断面大都是圆形或三心拱形,对软土条件下矩形地铁隧道的地震反应特性分析及抗震设计研究内容很少,本文以上海地铁 11 号线三个典型的软土场地为工程背景,建立了矩形地铁隧道的计算模型,通过采用 ANSYS 数值模拟分析,研究获得了不同软土地层条件下的矩形地铁隧道的地震反应特性及规律,为软土条件下矩形地铁隧道抗震设计和选址提供了参考依据。

1 矩形地铁隧道模型建立

1.1 软土场地背景

选取上海地铁 11 号线北段二期工程中三个典型的软土场地为工程背景,分别是:场地 1 为济阳路站到黄石路站,主要是粉质黏土和淤泥质土,土质最软;场地 2 为浦三路站到森林公园站,主要由粉质黏土和黏质粉土沉积而成,土质较软;场地 3 为黄石路站到云锦路站,主要由砂质粉土、粉质黏土和细砂沉积而成,土质相对较硬。本文主要分析这三种典型土质条件下的矩形隧道地震反映特性及规律,为软土地区隧道抗震设计及选址提供参考依据。

1.2 边界条件与计算模型的确定

上海地铁 11 号线地下隧道埋深 10 ~ 24.6 m,隧道断面为矩形,宽 5 m,高 5.3 m,运用有限元分析软件 ANSYS 建立模型并进行网格划分,有限元模型的计算区域取 40 m × 40 m,建立的模型边界为顶部自由,左右两侧设置竖向约束,底部设置全约束,隧道结构的建模选取 Drucker-Prager 弹塑性模型。模型的单元划分如图 1 所示,模型中拾取关键点部位如图 2 所示。

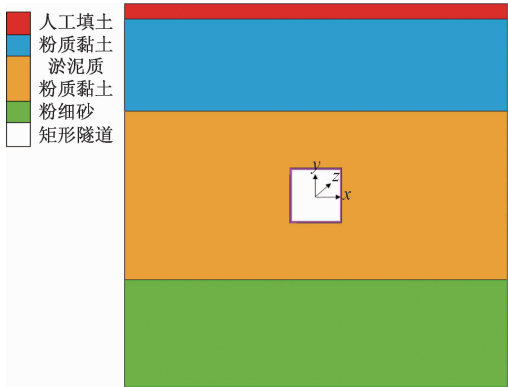


图 1 模型划分图
Fig. 1 Model partition diagram

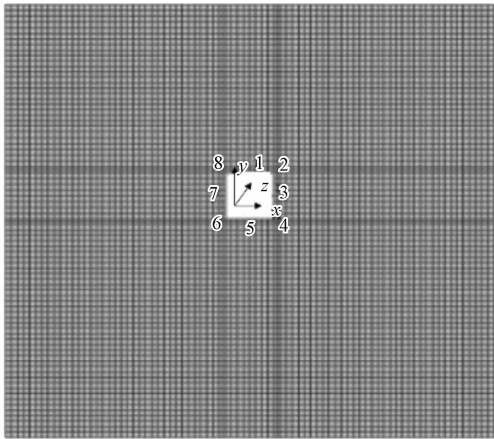


图 2 拾取关键点部位示意图
Fig. 2 Schematic diagram of key points

2 矩形地铁隧道地震反应主应力

通过 ANSYS 有限元数值模拟,采用瑞利阻尼法,在矩形隧道计算模型的基岩段水平输入 El-Centro 地震波,可得到场地 1、场地 2 和场地 3 的地震反应主应力云图(图 3)。

由图 3 分析可知:在同一水平地震作用下,数值模拟分析得到的每个场地主应力云图特点大致相同,隧道结构局部达到最大主应力的时间基本相同,出现最大主应力的位置也都在矩形隧道断面的拐角处,这说明矩形地铁隧道在软土地层中不论场地土体软弱程度如何,隧道断面的四个拐角处都是主应力最大部位,更是地震荷载作用下的应力集中部位,容易先发生破坏,因而在矩形断面隧道抗震设计中要充分考虑断面拐角处应力集中对衬砌结构的影响,应加强塑性设计。

另外,得到三种场地出现最大主应力时各关键节点的应力值如表 1 所示,对比表中应力值可以发现,所有节点主应力极值的绝对值大小按场地 1、2、3 的顺序

表 1 三种场地各关键节点主应力值
Table 1 The stress values of each key node of the three sites

关键节点	应力值/kPa		
	场地 1	场地 2	场地 3
节点 1	- 195 047	- 171 208	- 109 751
节点 2	- 1 740 000	- 1 520 000	- 989 646
节点 3	- 195 047	- 171 208	- 109 751
节点 4	1 740 000	1 520 000	989 646
节点 5	195 047	171 208	109 751
节点 6	- 1 740 000	- 1 520 000	- 989 646
节点 7	- 195 047	- 171 208	- 109 751
节点 8	1 740 000	1 520 000	989 646

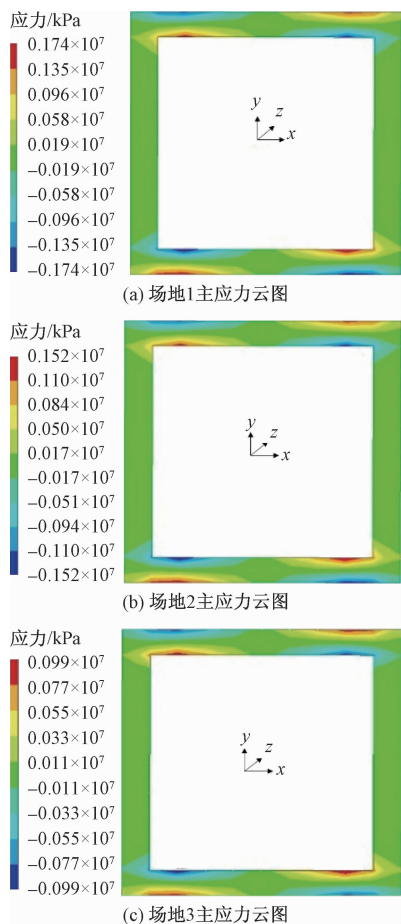


图3 三种场地矩形地铁隧道主应力云图

Fig. 3 The main stress cloud in three kinds of tunnel

依次递减。这说明最大主应力极值与土体松软程度有关,土质越松软,主应力极值就越大,这与实际情况相符,也证明 ANSYS 有限元数值模拟的可行性。

3 矩形地铁隧道地震反应水平位移

数值模拟得到三种场地条件下矩形隧道地震反应水平位移云图如图4所示。从图4中分析可知:三种场地条件下,矩形地铁隧道最大水平位移位置均出现在隧道顶部,且在隧道周围土体对衬砌结构的约束作用下,隧道结构整体的水平位移变形较协调,这也说明了混凝土衬砌支护结构的整体性较好;从图4中还可看出,隧道断面上部位移大于下部位移,因此,隧道上部结构容易较早发生破坏,应加强隧道上部衬砌结构的支护和抗震设计。

4 矩形地铁隧道地震反应加速度

为了研究矩形地铁隧道同一场地条件下不同位置及不同场地同一位置情况下的水平加速度变化情况,

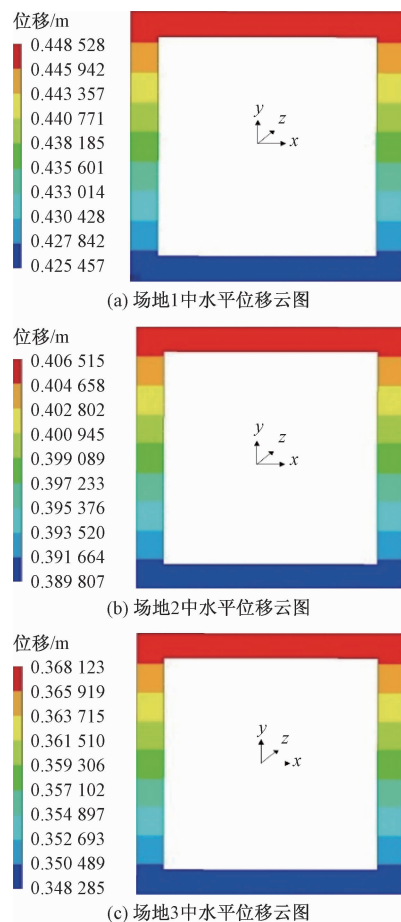


图4 三种场地条件下地震反应水平位移云图

Fig. 4 The maximum displacement diagram of the model in three kinds of fields

选取了场地1中(节点1、3、5)、场地2及场地3中(节点1、3)的隧道顶部、中部及底部的特殊位置进行地震水平加速度时程分析,结果如图5所示。从图5中分析可知:在同一水平地震作用下,处于软土地层中的矩

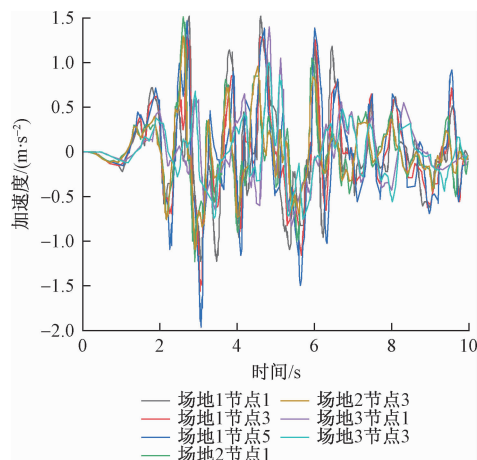


图5 地震水平加速度时程曲线

Fig. 5 The horizontal acceleration path curve

形地铁隧道不论场地条件如何,各个节点地震水平加速度时程变化趋势相似,但矩形隧道地震反应的最大水平加速度在三种场地相同位置处出现的时间并不一致,而对同一时刻加速度进行分析可知,隧道底部的水平加速度最大,隧道中部的水平加速度次之,隧道顶部的水平加速度最小,因此,软土地层条件下的矩形隧道抗震设计应该考虑这方面。

5 结论

(1)同一水平地震作用下,软土矩形隧道结构局部达到最大应力时间基本相同,最大应力均出现在矩形隧道断面拐角处。

(2)同一水平地震作用下,最大水平位移均出现在隧道顶部,最小水平位移出现在隧道底部,隧道结构整体水平位移较协调。

(3)同一水平地震作用下,最大水平加速度隧道底部最大、中部次之、顶部最小。

(4)同一水平地震作用下,水平位移随软土坚硬程度的加大而变小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 戚承志,张玉佳,丁常树,等. 地铁结构抗震研究中的若干问题[J]. 北京建筑工程学院学报, 2007, 23(1):1-5.
QI Chengzhi, ZHANG Yujia, DING Changshu, et al. Several problems in aseismic study of subway structures [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2007, 23(1):1-5.
- [3] 陈庆,项宗方. 地下结构抗震研究现状综述[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(6):130-133.
CHEN Qing, XIANG Zongfang. Summary of the present states for seismic response analysis of underground structures [J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(6):130-133.
- [4] 朱合华,陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998(2):26-32.
ZHU Hehua, TAO Lyubin. Study on two beam-spring models for the numerical analysis of segments in shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998(2):26-32.
- [5] 李向辉. 浅谈地下结构的抗震设计及ANSYS软件在其中的应用[J]. 矿产勘查, 2014, 7(5):55-57.
LI Xianghui. Discussion on seismic design of underground structures and application of ANSYS software [J]. Geotechnical Engineering World, 2014, 7(5):55-57.
- [6] 梁剑. 地铁地下结构抗震分析及设计中的关键问题[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(11):21.
LIANG Jian. Key problems in seismic analysis and design of subway underground structures [J]. Building Technology Development, 2017, 44(11):21.
- [7] 姜忻良,谭丁,姜南. 交叉隧道地震反应三维有限元和无限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2004, 37(4):307-311.
JIANG Yiliang, TAN Ding, JIANG Nan. 3D finite and infinite element analysis for seismic response of intersecting tunnel [J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 2004, 37(4):307-311.
- [8] 蔡海兵,彭立敏,李兴龙. 工作竖井与隧道连接处支护结构横向地震响应[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2):188-195.
CAI Haibing, PENG Limin, LI Xinglong. Transverse seismic response of supporting structures at working shaft and tunnel joints [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2):188-195.
- [9] 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, 29(3):101-107.
KONG Ge, ZHOU Jian, WANG Shaobo, et al. Study on seismic response law of shield tunnel communication channel [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3):101-107.