

局部液化地层范围及埋深对隧道地震上浮的影响研究

于伦超,钟小春*,张露露

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要: 杭州地铁4号线甬江路站—锦江站区间施工时需穿越大范围的可液化地层,为降低隧道在地震作用下上浮破坏的潜在风险,该区间选线时将隧道埋深进行了增大,从而使隧道部分处于非液化土层。为了研究在地震作用下盾构隧道局部液化地层范围以及隧道埋深对隧道上浮的影响,并对隧道调整后的抗震效果做出评价,采用有限差分软件FLAC^{3D}数值模拟与振动台试验相结合的方法,对处于不同液化土层分布范围、不同埋深的隧道地震上浮情况进行了数值分析及模型试验,研究表明:隧道液化地层范围越小,隧道上浮位移越小;当隧道埋深达14 m、隧道液化地层范围小于隧道范围一半时,隧道只发生轻微上浮;隧道设计时应尽量避免使隧道完全处于可液化地层中,可采取液化与非液化地层组合或增大埋深的方式,提高隧道结构的抗震安全性。

关键词: 盾构隧道;数值模拟;振动台试验;液化土层范围;隧道上浮

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Study on the Influence of the Local Liquefaction Formation Range and Burial Depth on the Seismic Floating Displacement of Tunnel

YU Lunchao, ZHONG Xiaochun*, ZHANG Lulu

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: During the construction of the section from Yongjiang Road Station to Jinjiang Station of Hangzhou Metro Line 4, a wide range of liquifiable strata should be traversed. In order to reduce the potential risk of the tunnel destruction which could be caused by tunnel floating when earthquake acts, the buried depth of the tunnel was increased, so that part of the tunnel was located in the non-liquefied soil layer. In order to study the influence of the local liquefaction formation range and burial depth on the seismic floating displacement of tunnel, and to evaluate the earthquake-resistance effect of the tunnel after adjustment, the finite difference software FLAC^{3D} numerical simulation and shaking table test were combined to carry out numerical analysis and model tests on the seismic uplift of tunnels in different liquefied soil layers and different buried depths. The results are as follows: the smaller the range of liquefied stratum is, the smaller the floating displacement is. When the tunnel is buried to 14 meters deep and the liquefaction ground layer of the tunnel is less than half of the tunnel area, the tunnel only slightly floats; Tunnels should avoid being completely in liquifiable formations, the seismic safety of the tunnel structure can be improved by combining the liquefied and non-liquefied stratum or increasing the buried depth.

Key words: shield tunnel; numerical simulation; shaking table test; range of liquefiable strata; tunnel uplift

杭州地铁4号线1期工程甬江路站—锦江站区间盾构隧道施工时需要穿越超过1 000 m长的可液化粉细砂地层。通过对阪神大地震的研究^[1],发现

在可液化地层中,饱和砂土在地震荷载作用下液化后对地下结构的破坏较为严重,可液化砂土地层在地震作用下可能导致隧道破坏的问题需要引起重

收稿日期:2020-08-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678217)

作者简介:于伦超(1996-),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事盾构隧道施工方向研究。

* 通讯作者:钟小春(1976-),男,江西萍乡人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事盾构隧道施工技术研究。

视。纵观国内外盾构地铁隧道发展历史,几乎没有类似杭州地铁这种长距离穿越可液化地层的工程先例,中长距离穿越可液化地层的地铁工程也不多见,因此需对该工程中可液化砂土地层导致的隧道上浮风险进行预估。

目前,关于盾构隧道结构横断面的地震响应问题,国内外已有不少研究。耿萍等^[2]在晏启祥等^[3-5]研究的基础上,考虑了P波和S波两种不同波速以及地层与隧道结构发生滑移或不发生滑移^[6]的两种工况,对比分析拟静力数值求解法与解析公式法在计算过程中及计算结果的差异性,给出深埋盾构隧道的内力求解的建议方法。蒋英礼等^[7]采用反应位移法对盾构隧道的横向抗震问题进行研究,将衬砌结构受到的力分为非地震荷载作用下的内力和地震荷载作用下的内力增量两部分,据此进行抗震计算,得出同一横截面上弯矩、轴力的大小分布情况。郑代靖等^[8]采用理论分析和数值模拟等方法对正弦地震波不同振幅、频率和地震持续时间作用下的饱和砂土地层中盾构隧道动力响应进行了分析。另外,国内外学者还对可液化砂土地层盾构隧道的结构力学行为及液化地基的处理等方面进行了一些研究。刘光磊等^[9]利用DIANA SWANDYNE-II对可液化砂土地层中地铁隧道结构的地震响应进行了模拟,并与动力离心模型试验结果进行了对比。刘洋等^[10]利用有限差分数值模拟软件FLAC^{2D}在可液化砂土中对区间隧道的地震响应进行了分析,主要研究了衬砌混凝土等级、密度、厚度、隧道埋深等因素的影响。段亚刚等^[11]分析了地震作用下液化砂层对隧道的影响,并提出了抗液化砂层的处理原则。安军海等^[12-14]通过振动台模型试验研究可液化地基土的地震响应问题并提出相应的抗震措施。周军等^[15]采用ANSYS开展了对可液化砂土地层盾构隧道在横向地震波激励下的动力响应和地层加

固减震效果进行量化研究,认为盾构隧道范围内的地基加固有利于减少隧道的横向位移。

尽管目前对于盾构隧道结构的地震响应问题已有不少研究,但大多是在非液化土层中展开,针对液化土层的研究较少,即使针对可液化土层但是考虑隧道上浮问题的研究则更少。仅有的可液化土层中隧道上浮问题的研究^[16-19]也主要是开展理论研究,几乎没有针对工程中隧道周围液化土层范围对隧道地震上浮影响的研究。因此,本文依托杭州地铁4号线甬江路站—锦江站区间为工程背景,利用有限差分数值模拟软件FLAC^{3D}与振动台试验相结合,重点研究盾构隧道非全部处于液化土层时液化土层范围对隧道地震上浮的影响,以期为实际工程应用提供参考价值。

1 杭州地铁4号线工程背景

杭州地铁4号线一期工程线路长度约11.22 km,地下区间采用盾构法施工工艺,为双线单圆盾构隧道,其中甬江路站—锦江站区间沿富春路布展,西起闻潮路以西100 m,东至望潮路以东110 m,起点里程桩号为K12+557.621,终点里程桩号为K13+348.162,且沿线地层中存在超过1 000 m长的可液化砂质粉土地层。隧道外径6.2 m,埋深为7~16 m。

根据地勘资料,隧道所处断面地层从上到下依次有人工填土、砂质粉土及粉砂、淤泥质粉质粘土,隧道位置如图1(a)所示。最初选线的盾构区间隧道穿越全断面的可液化的砂质粉土。考虑到地震液化可能的上浮对隧道存在较大的危害,设计院决定加大隧道埋深,向下调整2.5 m,调整后的隧道位置如图1(b)所示,调整后的隧道埋深9.5~18.5 m,调整后的隧道下半部处于非液化地层中。但是这种液化和非液化土组合的地层对于

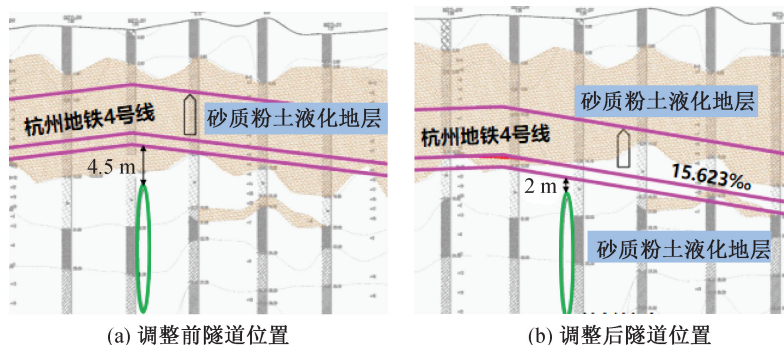


图1 隧道位置地勘图

Fig. 1 Geological Survey of tunnel location

盾构隧道地震作用下的影响是否不利,目前缺乏相关理论支持,其作用机理也不甚明确。

2 数值模型的建立及验证

2.1 模型的建立

根据杭州地铁 4 号线 1 期工程实际情况,隧道直径为 6.2 m,砂质粉土的实测标准贯入锤击数 N 取为 5,建立 FLAC^{3D} 数值计算模型如图 2 所示。模型尺寸大小为 80 m×50 m,动力分析过程中模型边界设定为自由场边界,模型底部设定为静态边界,采用局部阻尼的形式。有限元模拟中,砂质粉土层采用 Finn 孔压增长模型,其他土层采用摩尔-库仑模型,管片采用线弹性材料,隧道衬砌采用 shell 结构单元,隧道周围土体所处地层从上到下依次有人工填土、砂质粉土及粉砂、淤泥质粉质粘土,土体及管片衬砌材料参数见表 1 所示。

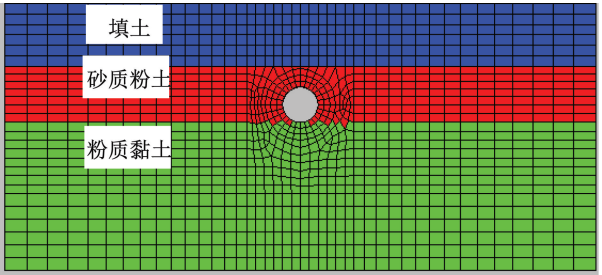


图 2 计算模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of calculation model

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

土层及管片性质	密度 /(kg·m ⁻³)	模量 /MPa	泊松比	粘聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
填土	1 800	9	0.35	13	16
砂质粉土	1 930	10	0.33	1	22
粉质粘土	1 830	6	0.27	44	14
管片	2 500	34 500	0.17	—	—

地震波的传播方向沿模型底部向上,振动为横向振动,杭州市地铁隧道属于重要工程,提高一度设防,地震设防烈度为 7 度,选取峰值加速度 0.15 g 地震波作为输入地震波,加速度时程线如图 3 所示。

2.2 数值计算过程

计算时,将各地层设置为摩尔库仑模型,进行静力阶段自重平衡计算,位移清零;模型初始应力求解完成后,对砂质粉土采用 Finn 液化模型,在模型底部输入地震波,进行模型的动力响应计算。

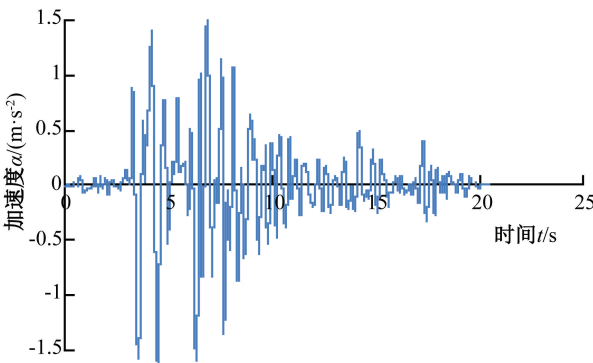


图 3 加速度时程曲线
Fig. 3 Acceleration time history curve

Finn 孔压增长模型可以较好地反映在地震荷载作用下孔隙水压力增长规律^[20-21],从而可以研究隧道在地震荷载作用下的上浮规律。

2.3 数值模型的验证

数值模拟过程中力学阻尼的设定方式、边界条件的设定方式、模型参数输入值等变量对数值计算结果有着较大的影响,因此需要对数值计算的精度进行校核,利用振动台模型试验结果对数值模拟计算的结果进行验证,试验装置如图 4 所示。本次试验所使用的振动台系统由苏试试验仪器有限公司生产,试验采用叠层柔性模型箱,采用有机透明材料及部分铝合金钢材制成,箱体尺寸 500 mm×300 mm×400 mm。隧道模型选用与原型相同的土体材料,将模型尺寸缩小为原型的 1/100,隧道模型纵向尺寸 30 cm,直径 6 cm。振动试验中测试数据包括:隧道顶部和底部孔压、隧道上浮量等。试验过程中地震峰值加速度设为 0.15 g。

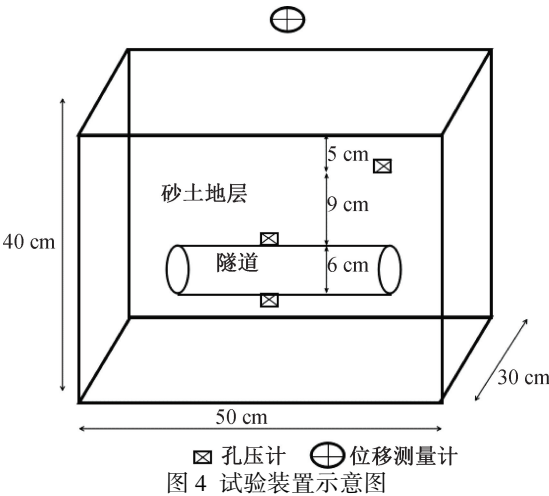


图 4 试验装置示意图
Fig. 4 Schematic diagram of test apparatus

本文所研究的问题为隧道周边土体液化导致隧道发生上浮破坏,而隧道上浮破坏研究需要更

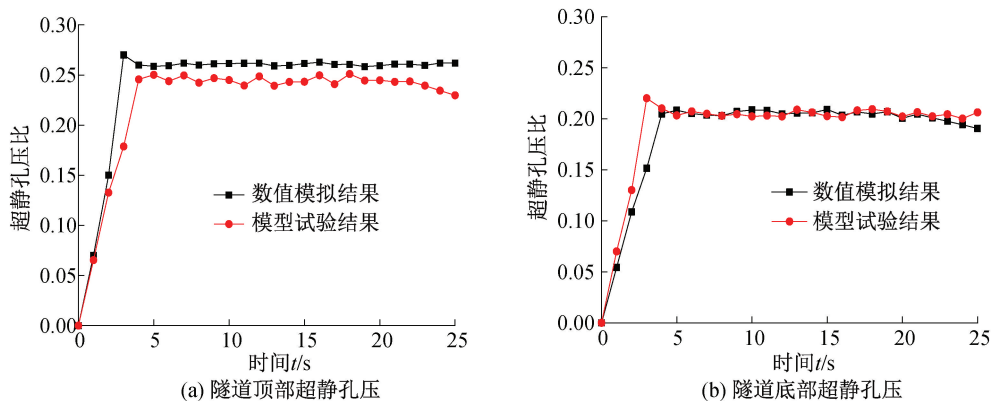


图5 数值模拟与模型试验超静孔压对比图

Fig. 5 Contrast figure of overstatic pore pressure in numerical simulation and model test

多地关注土体所达到的液化程度,即周边土体达到的超静孔压比峰值。所以,本次对于模型试验结果的校核应该参考土体的超静孔压比峰值差距,选取隧道上下部位土体的超静孔压比数据进行分析,将实验结果与数值分析中监测点位处的超静孔压比数据相比较,分别绘制图 5(a)、(b)所示的隧道顶部和底部的超静孔压比时程曲线。根据图 5 可知,对完全处于液化地层中的盾构隧道施加 0.15 g 峰值加速度的地震作用,模型试验结果和数值计算结果在超静孔压比上升阶段规律比较一致,表明所建立的计算模型满足开展液化层中盾构隧道动力响应研究的要求。

3 计算结果及讨论

3.1 数值计算结果

盾构隧道围岩中的液化地层厚度不同时,其地震响应应该有明显不同。为此,分别假定隧道顶部以下 0、1、2、3、4、5、6 m 范围内分布的土体为液化土,液化范围土体考虑为孔压增长模式的 Finn 模型,在修正标贯击数 $N=5$ 条件下进行动力计算分析,其他参数如隧道埋深 14 m(隧道顶部与地面的距离)、地下水位埋深在地面以下 1.5 m、隧道直径 6.2 m 和地震设防烈度 7 度(地震峰值加速 0.15 g)保持不变,计算得到隧道处于不同液化土范围时上浮位移的变化,上浮位移如图 6 所示,隧道上部 3 m 地基液化时隧道周围孔压云图如图 7 所示。分析图 6 可知,隧道上浮位移随着隧道所处液化土范围的减小而减小,但隧道处地基不发生液化时隧道仍然发生了部分上浮。

3.2 讨论

3.2.1 隧道上浮位移的分析

地基液化所产生的隧道上浮是由于隧道底部

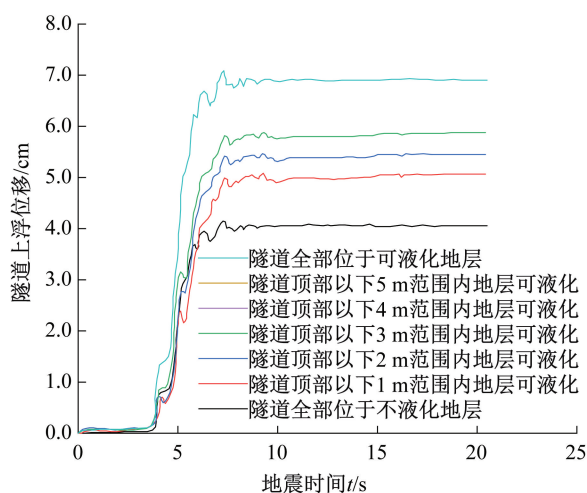


图6 隧道埋深 14 m 时隧道上浮位移随地震历时的变化

Fig. 6 Variation of uplift displacement with earthquake duration when the tunnel is 14 meters deep

所受到的浮力大于隧道自重与隧道顶部的压力之和,隧道产生上浮力,从而隧道发生上浮。分析图 7 可知隧道埋深 14 m 时,隧道局部地基发生液化的隧道底部孔压小于隧道顶部孔压,从受力分析角度来说,隧道底部基本不产生上浮力,也就是说,隧道应该基本不发生上浮,但从图 6 中可以看出,隧道仍然发生了上浮。

图 8 为地震时地下管线的上浮现象,由于发生管线上浮的农田并非为可液化的砂土地基,所以该现象的发生事实上并不是地基液化导致的。假定隧道完全处于非液化地层,进行数值计算可以得到如图 9 所示的隧道上浮位移,很显然这部分上浮位移并非由超静孔隙水压力上升导致。根据地震中观察到相对密度较轻的物体在地震作用下存在上浮现象,可以认为这部分隧道上浮是由于地震动剪切变形引起的。因此,考虑地震时地基液化时隧道上浮位移应含两部分:液化引起的上浮

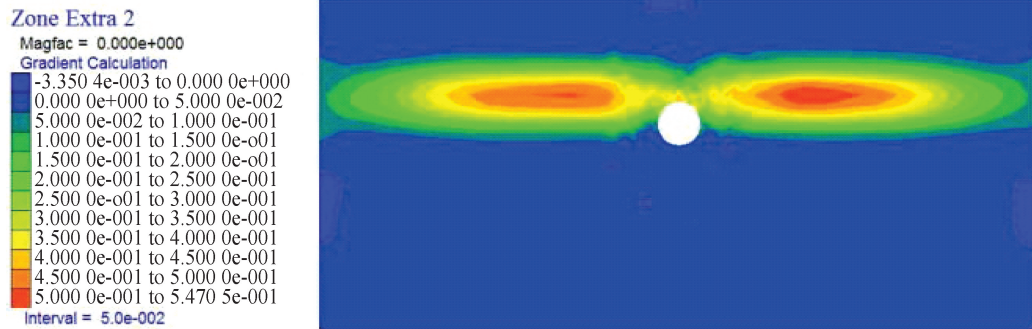


图7 地层液化时隧道周围孔压云图

Fig. 7 Hole pressure cloud map around tunnel during formation liquefaction

位移和地震动剪切变形引起的上浮位移。在埋深相差不大的情况下地震动剪切变形引起的隧道上浮属于均匀变形,对隧道结构的损害较小。因此,下面的分析和讨论主要是针对液化引起的上浮位移开展的,地层液化引起的上浮位移等于隧道总上浮位移减去地震动剪切变形引起的上浮位移。记地层液化引起的上浮位移为 S , 当 $S \leq 2$ cm 时,属于轻微上浮;当 $2 \text{ cm} < S \leq 5$ cm 时,属于中等上浮;当 $S > 5$ cm 时,属于严重上浮。



图8 地震时非液化地基中管线的上浮

Fig. 8 The uplift displacement of pipelines in a non-liquefied foundation during an earthquake

3.2.2 液化土范围对隧道上浮的影响分析

图10为隧道处于不同液化土范围时隧道上浮位移的变化。分析图10可知,隧道的上浮位移与隧道所处液化土范围有关,随着液化范围增大,隧道上浮位移基本呈线性增大。当隧道埋深大于10 m,隧道上部处于液化土范围小于3 m时,隧道的上浮量较小,基本小于5 cm,属于中等上浮;在隧道埋深大于14 m情况下,当隧道上部处于液化土范围小于3 m时,隧道的上浮量很小,小于2 cm,属于轻

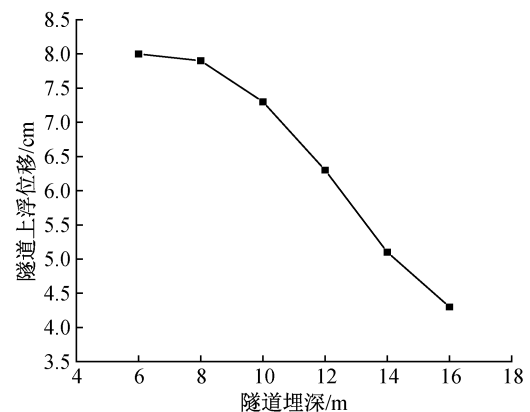


图9 地震动剪切变形引起的隧道上浮位移

Fig. 9 Uplift displacement of tunnel caused by shear deformation of ground motion

微上浮,提高了隧道结构抗震安全性。

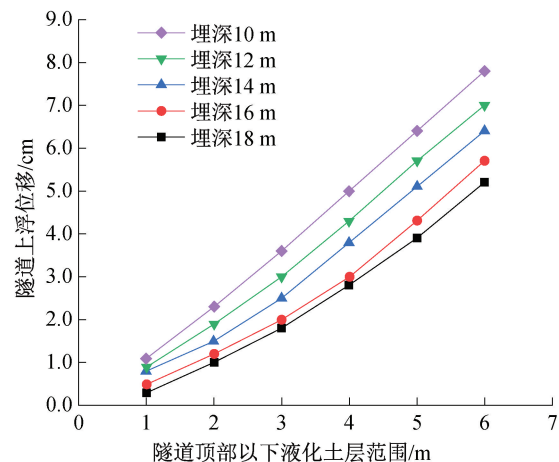


图10 隧道上浮位移随隧道所处液化土范围的变化

Fig. 10 Variation of uplift displacement of tunnel with the range of liquefied soil

3.2.3 隧道埋深对隧道上浮的影响分析

分析图11可以看出,随着隧道埋深的增加,隧道的上浮位移呈线性降低。此时,隧道上浮位移受隧道所处液化土范围和隧道埋深的共同影响,且由计算分析图10、图11可知,隧道所处液化土

范围对隧道上浮位移的影响更大;当埋深超过14 m时,埋深对隧道上浮的影响逐渐减小,此时,隧道上浮主要受隧道所处液化土范围的影响。隧道的埋深增加,隧道周边地基土体单元的超静孔压比降低,隧道埋深越大,隧道周围地基土体应力较大,地基土越不容易发生液化。

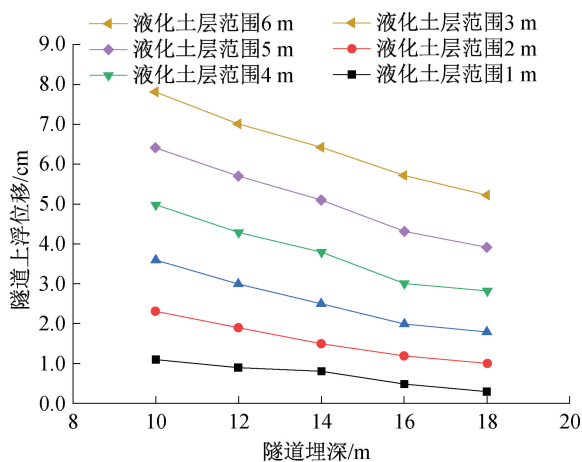


图 11 隧道上浮位移随隧道埋深的变化

Fig. 11 Variation of tunnel floating displacement with tunnel buried depth

4 杭州地铁工程案例

杭州地铁4号线1期工程甬江路站—锦江站区间在隧道位置调整前,隧道埋深约7~16 m,隧道全部处于砂质粉土地层中,属于可液化地层,根据数值模拟计算结果,由砂土液化引起的隧道上浮位移基本大于5 cm,属于严重上浮。隧道下调了2.5 m,调整后隧道埋深约9.5~18.5 m,隧道底部大约2.5~4 m范围处于非液化地层中,调整后隧道埋深增加了且隧道处于可液化地层的范围减少了。根据本文计算结果,隧道上浮位移基本小于5 cm,且大部分小于2 cm,也就是说隧道大部分只发生轻微上浮,上浮情况缓和了很多,同时,小部分上浮位移较大的地方,还可以通过注浆加固来减少液化产生的影响,从而达到轻微上浮的标准。杭州地铁4号线1期工程甬江路站—锦江站区间在对隧道位置进行调整后,有效地减小了隧道的上浮位移,隧道基本上只发生轻微上浮,提高了隧道结构的抗震安全性。

5 结论

1)隧道局部处于液化地层时,液化地层范围越小,隧道上浮位移越小;当埋深大于14 m、隧道结构超过一半的范围处于非液化土层时,隧道只

发生轻微上浮,对隧道结构安全较为有利。

2)在地震作用下隧道发生的上浮位移可以分为两部分:一是由地震地基剪切变形引起的隧道上浮;二是由于地层液化产生的上浮力引起隧道上浮。在隧道埋深基本一致的情况下,地基剪切变形引起的隧道上浮位移基本上是均匀的,对隧道结构影响较小。

3)隧道的埋深越大,隧道上浮位移越小。当埋深小于14 m时,隧道埋深对隧道上浮的影响较大;当埋深大于14 m时,埋深对隧道上浮的影响逐渐减小,此时隧道上浮主要受隧道所处液化土范围的影响。

4)基于杭州地铁4号线工程案例的经验,隧道设计时应尽量避免使隧道完全处于可液化地层中,可采取液化与非液化地层组合或增大埋深的方式,减小隧道的地震上浮位移,提高隧道的抗震安全性能。

参考文献:

- [1] 杜修力,王刚,路德春. 日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(02): 165-171.
- [2] 耿萍,周磊,晏启祥,等. 地震波作用下深埋盾构隧道的内力求解[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(01): 45-51.
- [3] 晏启祥,唐茂皓,何川,等. 基于薄壁圆柱壳理论的盾构隧道抗震拟静力分析法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(07): 1371-1376.
- [4] GEORGE P KOURETZIS, SCOTT W SLOAN, JOHN P CARTER. Effect of Interface Friction on Tunnel Liner Internal Forces Due to Seismic S- and P-wave Propagation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 46: 41-51.
- [5] KOURETZIS G P, ANDRIANOPOULOS K I, SLOAN S W, et al. Analysis of Circular Tunnels Due to Seismic P-wave Propagation, with Emphasis on Unreinforced Concrete Liners[J]. Computers and Geotechnics, 2014(55): 187-194.
- [6] 王维,何川,耿萍,等. 非均匀地层盾构隧道纵向抗震分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(06): 73-79.
- [7] 蒋英礼,王劲松. 基于反应位移法的盾构隧道横断面抗震计算[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(06): 52-57.
- [8] 郑代靖. 饱和砂土地层盾构隧道的地震动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] 刘光磊,宋二祥,刘华北. 可液化地层中地铁隧道地震响应数值模拟及其试验验证[J]. 岩土工程学报, 2007(12): 1815-1822.

(下转第77页)

- [11] 郑颖人,时卫民,孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(18): 3203-3210.
- [12] 蔡德钧,黄帅,闫宏业,等. 地下水位上升对边坡稳定性影响的拟静力分析[J]. 铁道建筑, 2015(01): 56-62.
- [13] 陈鹏. 水位升高对库岸边坡稳定性影响研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(12): 221-222.
- [14] 仇文岗,王尉,高学成. 库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J]. 武汉大学学报:工学版, 2019, 52(01): 21-26.
- [15] 张祖莲,梁谏杰,黄英,等. 库岸边坡倾角及水位变化对红土型库岸稳定性影响研究[J]. 山地学报, 2019, 37(01): 62-69.
- [16] 刘战峰,谷天峰,抗兴培. 地下水位上升对黄土斜坡稳定性的影响研究[J]. 地下水, 2017, 39(06): 61-63+162.
- [17] 张巷生,卢书强,刘欣,等. 三峡水库蓄水条件下树坪滑坡稳定性影响分析[J]. 水利规划与设计, 2020(05): 106-111.
- [18] 杨超. 库水位变化时边坡稳定性分析[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
- [19] XIA M, REN G M, XIN L. Deformation and Mechanism of Landslide Influenced by the Effects of Reservoir Water and Rainfall, Three Gorges, China[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2): 467-482.
- [20] WEI S, CHEN Y, YANG B B, et al. Study on the Stability of Baijiabao Landslide due to the Three Gorgeswater Level Rise[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 488-489: 470-474.
- [21] 谢林冲,王明清,周超. 基于降雨-库水联合作用下三门洞滑坡演化过程与机制[J]. 水电能源科学, 2020, 38(06): 128-132.
- [22] 刘先华,徐静. 三峡库水位升降对某大型滑坡堆积体稳定性的影响分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2015, 51(01): 34-36.
- [23] 濮声荣. 黄土地区水库岸坡变形[J]. 人民黄河, 1983(05): 2-5.
- [24] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005(05): 769-773.
- [25] 张杨. 汾河水库库岸边坡特征及稳定性分析[D]. 太原:太原理工大学, 2010.
- [26] 张永忠,张宏家,董国梁. 水位波动对黄土坡滑坡稳定性的影响分析[J]. 地下水, 2010, 32(01): 138-140.
- [27] 宋丹青,王丰,梅明星,等. 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 郑州大学学报:工学版, 2016, 37(01): 60-64.
- [28] 熊茹雪,洪托,白杰. 基于渗流-应力耦合的库岸边坡稳定性分析——以祥云县清水河水库为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(04): 59-66.
- [29] SL 386—2007,水利水电工程边坡设计规范[S].
- [30] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004(03): 76-80.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第62页)

- [10] 刘洋. 区间隧道穿越可液化土层的地震响应分析[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [11] 段亚刚. 大范围地震液化条件下地下结构设计研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(10): 49-53.
- [12] 安军海,陶连金,王焕杰,等. 可液化场地下盾构扩挖地铁车站结构地震破坏机制振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(08): 2018-2030.
- [13] 程学磊,崔春义,孙宗光. 饱和软土自由场地地震反应特性振动台试验[J]. 地震工程学报, 2019, 41(01): 108-116.
- [14] 段志慧,窦远明,王建宁,等. 软土地基盾构隧道地震动力响应振动台模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(02): 106-110.
- [15] 周军,伍伟林,胡瑞青. 可液化砂土地层盾构隧道地震响应研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12): 83-88.
- [16] 邹德高,孔宪京, LING H I, 等. 地震时饱和砂土地基中管线上浮机理及抗震措施试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002(03): 323-326.
- [17] 孔宪京,邹德高. 基于液化后变形分析方法的地下管线上浮反应研究[J]. 岩土工程学报, 2007(08): 1199-1204.
- [18] 刘华北,宋二祥. 可液化土中地铁结构的地震响应[J]. 岩土力学, 2005(03): 381-386+391.
- [19] 陈韧韧. 可液化地层中地下结构地震响应的基本规律与分析方法[D]. 北京:清华大学, 2018.
- [20] 王根龙,林玮,蔡晓光. 基于 Finn 本构模型的饱和砂土地震液化分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(03): 178-184.
- [21] 彭加强,钟小春,王奇,等. 盾构隧道穿越液化地基上浮振动台试验分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2): 60-67.

(责任编辑 周雪梅)