

# 排水桩加固及动力荷载强度对可液化地层中 盾构隧道动力响应的影响<sup>\*</sup>

冯 义

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710075, 西安//高级工程师)

**摘 要** 目的:隧道工程作为大型地下结构工程之一,穿越可液化地层时面临着较大的液化破坏风险。对此,需分析排水桩加固及动力荷载强度对可液化地层中盾构隧道动力响应的影响。**方法:**建立了可液化土层中液化动力响应的数值分析模型,并通过实际工程案例验证了该模型的有效性。依托上海市轨道交通崇明线工程,应用该模型进行液化场地加固动力响应分析,评价了液化场地采用排水桩加固措施的效果和加固作用范围,分析了不同动力荷载强度下隧道穿越可液化地层的动力响应。**结果及结论:**Plaxis2D 软件中的UBC3D-PLM 本构模型可有效模拟可液化地层中的孔压动力响应;在一定范围内隧道两侧的排水桩可有效抑制动荷载作用下可液化土层液化的发生;动力荷载强度主要对超孔压积累和增长模式产生影响;当动力荷载加速度峰值达到 $0.2\text{ g}$ ( $g$ 为重力加速度)后,可液化土层超孔压比累积增长规律基本一致,均在振动初期达到完全液化,并且超孔压随着振动荷载作用时间的增加而趋于稳定。

**关键词** 盾构隧道工程;可液化地层;动力响应;排水桩加固;动力荷载强度

**中图分类号** TU435

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.08.008

## Influence of Drainage Pile Reinforcement and Dynamics Load Intensity on Dynamics Response of Shield Tunnelling in Liquefiable Stratum

FENG Yi

**Abstract** Objective: As one of the large underground structure projects, tunnel engineering faces a significant liquefaction damage risk when crossing liquefiable stratum. Targeting this issue, it is necessary to analyze the influence of drainage pile reinforcement and dynamics load intensity on dynamics response of shield tunnelling in liquefiable stratum. **Method:** A numerical analysis model of liquefaction dynamics response in liquefiable stratum is established, and the effectiveness of the

model is validated through an actual engineering case. Based on Shanghai Rail Transit Chongming Line project, the model is applied to analyze the dynamics response of liquefaction site reinforcement, evaluate the effect and scope of drainage pile reinforcement measures for liquefaction site, and analyze the dynamics response of tunnel crossing liquefiable stratum under different dynamics load intensities. **Result & Conclusion:** The UBC3D-PLM constitutive model in Plaxis2D software can effectively simulate the pore pressure dynamics response in liquefiable stratum. The drainage piles on both sides of the tunnel can effectively suppress the liquefaction in liquefiable soil stratum within a certain range for under dynamics load action. The dynamics load intensity mainly affects the accumulation and growth pattern of excess pore pressure. When dynamics load peak acceleration reaches  $0.2\text{ g}$  (where  $g$  is the gravitational acceleration), the excess pore pressure accumulation growth pattern of liquefiable stratum is basically consistent, arriving at complete liquefaction at the initial vibration stage, and the excess pore pressure tends to stabilize with the increase of vibration load action time.

**Key words** shield tunneling engineering; liquefiable stratum; dynamics response; drainage pile reinforcement; dynamics load intensity

**Author's address** China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710075, Xi'an, China

隧道工程作为大型地下结构工程之一,其穿越可液化地层时面临着较大的液化破坏风险<sup>[1]</sup>,随着近年来地下工程的不断发展,隧道的动力响应研究受到越来越多的关注。

文献[2]进行了饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验;文献[3]针对可液化地基中车站结构周边地基的液化区分布特性及其位移矢量场,进行了数值模型分析;文献[4]针对盾构隧道穿越液

<sup>\*</sup> 中铁第一勘察设计院科研开发项目(院科 20-56-1)

化地基的动力破坏风险,进行了小型振动台试验研究;文献[5]开展了砂土地基振动台试验;文献[6]针对加拿大某沉管隧道砂土液化问题,开展了动力离心机试验。

UBC3D-PLM 本构模型能很好地描述饱和土层液化特性。文献[7-11]利用该模型对可液化层的动力响应进行了研究。本文依托上海轨道交通崇明线工程(以下简称“崇明线工程”),利用 Plaxis2D 岩土数值模拟软件,基于 UBC3D-PLM 土体本构建立数值模型,分析评价排水桩加固措施的效果及范围,并探究不同动力强度下隧道穿越可液化地层的动力响应。

# 1 工程概况

崇明线工程线路起自上海市浦东新区金桥地区,终于上海市崇明区陈家镇,是一条快速联系崇明岛、长兴岛和上海城区的市域线,跨越长江入海口。崇明线工程的地理位置示意图如图 1 所示。崇明线工程线路长约 40.82 km,共设 8 座地下站,线路设计速度为 120 km/h。



图 1 崇明线工程地理位置示意图

Fig. 1 Geological location of Chongming Line project

本文研究的范围为崇明线工程的崇明岛陆域段地下盾构区间(以下简称“崇明地下段”),具体范围为 3<sup>#</sup>大小盾构转换井—陈家镇站—东滩站—高架起点。崇明地下段采用的盾构管片直径为 6.9 m,环宽为 1.5 m。崇明岛为长江入海口冲积形成,为我国第三大岛,地质条件特殊而复杂。拟建场地

在 20 m 深度范围内有饱和的可液化砂质粉土层,面临着地震作用下的破坏及上浮等风险。

## 2 模型的参数选取及验证

本研究使用 Plaxis2D 软件来进行数值模拟,其中,可液化的砂质粉土层采用 UBC3D-PLM 本构模型,上覆粉质黏土层及下部黏土层采用 M-C(Mohr-Coulomb)本构模型,隧道采用线弹性本构模型进行模拟。

### 2.1 本构模型参数的选取

材料主要参数如表 1 所示。

表 1 材料主要参数

Tab. 1 Main parameters of materials

类别	饱和重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
粉土	19.2	0.8	20	0.33	0	22
黏土	20.0	0.5	50	0.33	30	20
隧道	12.0	0.5	1 000	0.38		

UBC3D-PLM 模型是一个非线性弹塑性模型,能通过捕捉砂土或黏土的地震液化行为来累积塑性应变和孔隙水压力。该本构模型在本文数值模拟中所采用的其他参数按照关联公式推出。关联公式如表 2 所示<sup>[7,10-13]</sup>。

### 2.2 模型验证

本文通过对实际工程的数值模拟来验证模型的可靠性和有效性。

1971 年美国加利福尼亚洲 San Fernando 地区发生 6.6 级大地震。San Fernando 大坝地基场地的基岩为胶结不良的砾岩或粗粒砂岩,在地震作用下发生土体液化,导致大坝主体被破坏,出现溃坝现象。本文选择 San Fernando 大坝液化溃坝的实际工程案例,根据大坝实际土层和尺寸进行数值建模。

San Fernando 大坝主要土层包括基岩、冲积土、水力冲填土及黏土心墙。San Fernando 大坝模型尺寸如图 2 所示。大坝整体跨度为 100 m,高度为 25 m,坡度为 1:2;基岩整体长度为 300 m,高度为 10 m。通过在模型底部设置线位移和位移乘子来模拟大坝所受的地震作用。使用 El-Centro1 加速度谱施加激励,峰值加速度为 0.6 g(g 为重力加速度)。模型两侧为自由场约束,底部为固定约束。大坝上游水位为 15 m,下游水位为 -1 m。

大坝各处表面位移的数值计算结果与实际结

表 2 校准参数 UBC3D-PLM 模型的关联公式

Tab.2 Correlation formula of calibration parameters in UBC3D-PLM model

参数符号	参数名称	参数关联公式或经验值
$D_r$	相对密度/%	$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}}$ 。其中, $e_{\max}$ 为最大孔隙比, $e_{\min}$ 为最小孔隙比, $e_0$ 为天然孔隙比
$N_{1,60}$	修正的标准贯入试验锤击数/次	$N_{1,60} = (D_r/15)^2$
$K_{eG}$	弹性剪切模量/kPa	$K_{eG} = 21.7 \times 20 (N_{1,60})^{0.333}$
$K_{eB}$	弹性体积模量/kPa	$K_{eB} = 0.7 K_{eG}$
$K_{PG}$	塑性剪切模量/kPa	$K_{PG} = K_{eG} + 0.003 (N_{1,60})^2 + 100$
$m_e$	弹性体积模量指数	经验值取 0.5
$n_e$	弹性剪切模量指数	经验值取 0.5
$n_p$	塑性剪切模量指数	经验值取 0.4
$\varphi_{cv}$	恒定体积摩擦角/(°)	由固结排水三轴试验得出
$\varphi_p$	峰值有效摩擦角/(°)	$\varphi_p = \varphi_{cv} + 0.2 N_{1,60}$
$R_f$	双曲线失效率	$R_f = 1.1 (N_{1,60})^{-0.15}$
$P_a$	选定单位大气压/kPa	100
$\sigma_t$	截止拉应力/MPa	经验值取 0
$f_{dens}$	致密化系数	经验值取 1
$f_{Epost}$	液化后行为调整参数	经验值取 0.2 ~ 1.0

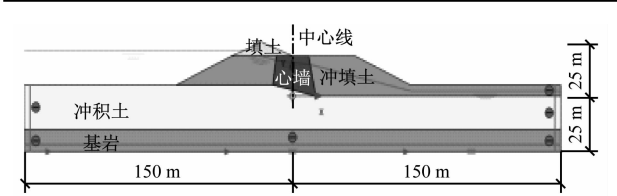


图 2 San Fernando 大坝数值模型尺寸

Fig.2 Dimensions of San Fernando dam numerical model

果对比如图 3 所示。由图 3 可见,数值模拟结果与实际测量结果数值相差不大,二者规律基本吻合。这说明 UBC 本构模型能较好模拟出砂土液化的现象,能对砂土地基液化中的结构物变形进行分析。

### 3 崇明线工程的建模与计算

#### 3.1 模型建立

崇明线工程的数值模型尺寸如图4所示。模型

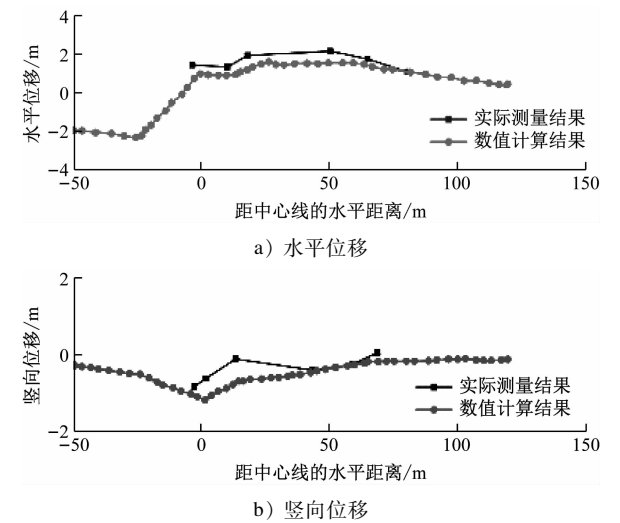


图 3 大坝各处表面位移对比

Fig.3 Comparison of surface displacements at different locations of the dam

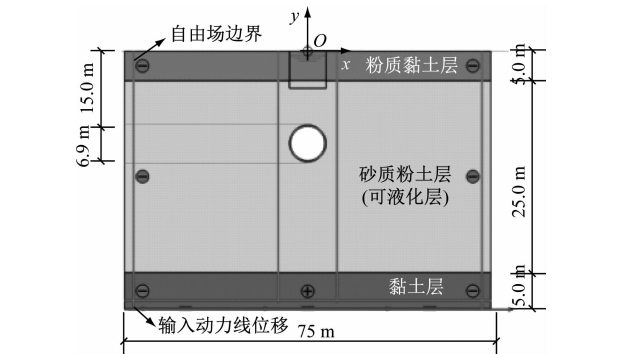


图 4 崇明线工程数值模型尺寸

Fig.4 Specific dimensions of Chongming Line project numerical model

长度为 75 m,深度为 35 m,隧道直径为 6.9 m,模型全局水位线设置在地表处,隧道和砂质粉土地基之间使用默认的接触面来模拟隧道-土之间的相互作用。

建模时,Plaxis2D 软件使用 15 节点三角形平面应变单元自动来创建网格。网格的生成主要考虑土层、结构物、外部荷载及边界条件。为了平衡结果精度和计算时间,需要划分合适的网格尺寸。由文献[13]可知,若要准确模拟动力荷载的传播过程,就需限制网格的平均尺寸。文献[13]建议,平均单元尺寸  $\Delta$  应小于等于输入波最高频率分量相关波长  $\lambda$  的 1/8,即:

$$\Delta \leq \frac{\lambda}{8} = \frac{v_{s,\min}}{8f_{\max}} \quad (1)$$

式中:

$v_{s,\min}$ ——最低剪切波速;

$f_{\max}$ ——输入波最高频率。

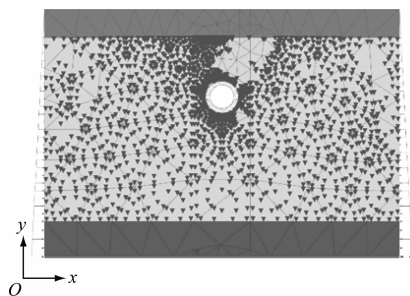
### 3.2 计算结果分析

#### 3.2.1 排水措施的加固动力响应

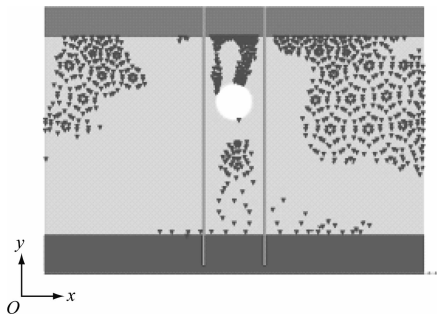
为对比排水措施效果,本文对比分析了隧道不采取排水加固措施及隧道两侧采用排水桩加固(仅考虑其排水性能)两种工况下的模型动力响应。

Plaxis2D 软件会根据应力点的超孔压比来判断

该点是否液化。图 5 为崇明线工程可液化层的液化点图。由图 5 可知:不采用排水措施工况下,隧道四周土体液化现象明显;在隧道两侧采用排水措施的工况下,仅在上部隧道存在较为密集的液化点,排水体周围几乎不发生液化现象。这可以说明采用排水措施有效限制了动力荷载作用下可液化层液化现象的发生。



a) 不采用排水措施工况



b) 采用排水桩措施工况

图 5 崇明线工程的可液化层液化点图

Fig. 5 Liquefaction point diagram of the liquefiable stratum in Chongming Line project

在隧道两侧采用排水桩加固的工况下,可液化土层内不同深度位置(P1、P2、P3、P4)处的超孔压比时程曲线如图 6 所示。P1、P2、P3、P4 距隧道的水平距离为 12 m,埋深分别为 28、18、12、6 m。可以看出:采用排水加固措施后,可液化土层内仅在浅层发生了较大的超孔压累积,而隧道深度附近可液化层内的孔压比上升较慢。

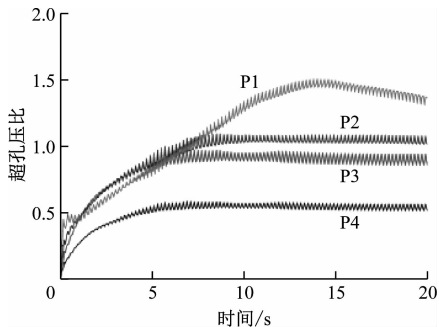


图 6 采用排水桩措施工况超孔压比时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of excess pore pressure ratio under the working condition of adopting drainage pile measures

在隧道同一深度的可液化地层中,选择距一侧排水桩的不同距离  $s$  ( $s$  取 2、4、6、8 m) 设置观测点,最终得到不同  $s$  处的超孔压时程曲线,如图 7 所示。

由图 7 可见:随着  $s$  的增大,超孔压比的峰值开始逐渐增大,分别对应 0.40、0.55、0.90 和 1.00;当

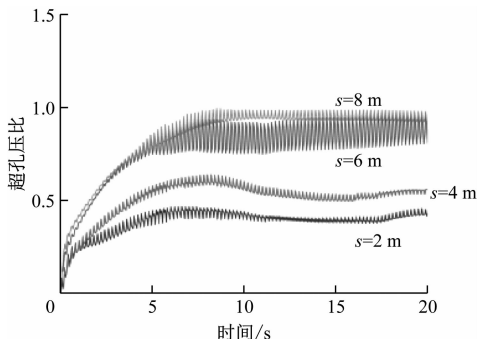


图 7 不同  $s$  处的超孔压比时程曲线

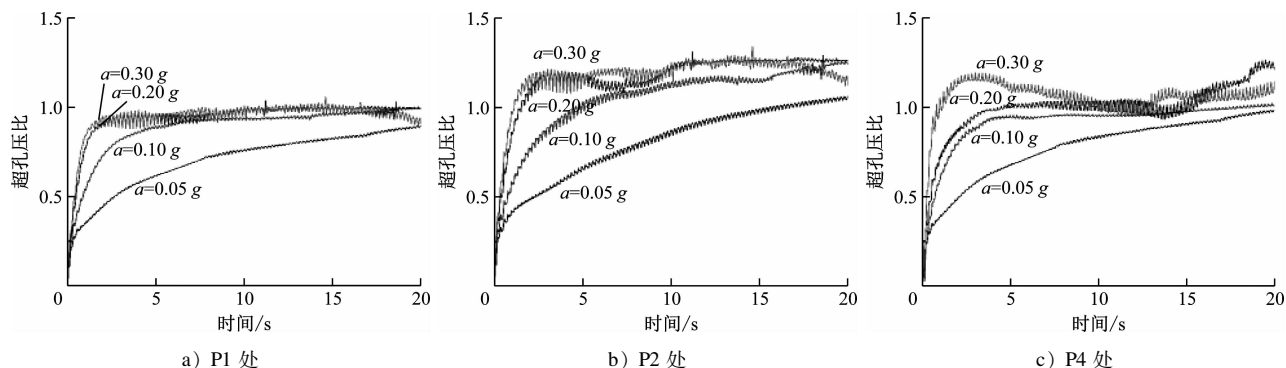
Fig. 7 Time-history curves of excess pore pressure ratio at different  $s$  conditions

$s=6$  m 时,超孔压无明显消散过程; $s=2$  m 和  $s=4$  m 处的超孔压比峰值较小,而  $s=6$  m 和  $s=8$  m 处的超孔压比峰值明显增大。这说明排水措施具有抗液化作用,且在  $s \leq 4$  m 范围内的作用效果明显。

#### 3.2.2 不同动力荷载强度下的动力响应

为分析不同强度动力荷载下的可液化地基动力响应,本文设计了加速度峰值不同的 4 种动力荷载,其加速度峰值  $a$  分别为 0.05 g、0.10 g、0.20 g 和 0.30 g。本文对典型的 P1、P2 及 P4 处超孔压比进行分析,得到不同  $a$  下不同深度处的超孔压比时程曲线如图 8 所示。

由图 8 可见: $a=0.05$  g 时,可液化土层在各深度处超孔压比于 20 s 左右达到峰值; $a=0.10$  g

图8 不同 $a$ 下不同深度处的超孔压比时程曲线Fig.8 Time-history curves of excess pore pressure ratio at different depths under different  $a$  conditions

时,在7 s左右超孔压比达到峰值; $a = 0.20 g$ 及 $a = 0.30 g$ 时,在2.5 s左右超孔压比达到峰值;不同动力荷载强度下的超孔压比峰值基本相同,其中上部土层中超孔压比峰值达到1.24,中部土层中超孔压比峰值达到1.22,下部土层中超孔压比峰值达到0.93。说明不同动力荷载强度条件主要对超孔压积累和增长模式产生有影响,随着 $a$ 的增大,超孔压积累的速率越快,超孔压比达到峰值的时间就越短。

$a$ 为0.05 g、0.10 g和0.20 g工况之间的超孔压累积速率差异明显; $a = 0.20 g$ 和 $a = 0.30 g$ 整体差异较小; $a$ 超过0.20 g后,可液化层超孔压比积累增长规律基本一致。这表明:动力荷载强度低于某一阈值时,动力荷载强度就不足以使得可液化土层的超孔压达到峰值,但随着动荷载强度的增大,可液化土层超孔压比达到峰值的时间越短;而动力荷载强度达到某一阈值后,可液化土层超孔压比积累增长规律基本一致。

## 4 结论

1) 利用Plaxis2D岩土工程有限元分析软件,建立UBC3D-PLM本构模型,可有效模拟可液化地层中的孔压动力响应。

2) 隧道两侧采用排水桩加固措施,能有效限制动力荷载作用下可液化土层发生液化现象,且在排水设施一定范围内的防液化作用效果显著。

3) 动力荷载强度对超孔压积累和增长模式有较大影响。当 $a$ 达到0.20 g后,可液化土层超孔压比积累增长规律基本一致,均在2.5 s时达到完全液化状态,并且超孔压比随着振动荷载作用时间的增加而趋于稳定。

## 参考文献

- [1] 郑刚, 杨鹏博, 周海祚, 等. 可液化地层中矩形隧道的上浮响应分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊1): 257.  
ZHENG Gang, YANG Pengbo, ZHOU Haizuo, et al. The uplift response of rectangular tunnel in liquefiable soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 257.
- [2] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北, 等. 饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2070.  
LIU Guanglei, SONG Erxiang, LIU Huabei, et al. Dynamic centrifuge tests on seismic response of tunnel in saturated sandy foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2070.
- [3] 庄海洋, 龙慧, 陈国兴, 等. 可液化地基中地铁车站周围场地地震反应分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 81.  
ZHUANG Haiyang, LONG Hui, CHEN Guoxing, et al. Seismic responses of surrounding site of subway station in liquefiable foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 81.
- [4] 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(增刊2): 60.  
PENG Jiaqiang, ZHONG Xiaochun, WANG Qi, et al. Analysis on shaking table experiment for shield tunnel through liquefied foundation[J]. Tunnel Construction, 2018(S2): 60.
- [5] JUNICHI K, OSAMU M, YASUYUKI K. Uplift behavior of underground structures caused by liquefaction of surrounding soil during earthquake [J]. Soils and Foundations, 1997, 37(1): 97.
- [6] YANG D, NAESGAARD E, BYRNE P M, et al. Numerical model verification and calibration of George Massey Tunnel using centrifuge models[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(5): 921.
- [7] BEATY M H, BYRNE P M. Documentation report: UBCSAND constitutive model on Itasca UDM web site—UBCSAND constitutive model version 904aR[Z]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2011.

(下转第55页)

way Society, 2016, 38(10): 108.

- [6] 张毫毫, 雷明锋, 刘凌晖, 等. 新建隧道下穿施工对既有上卧盾构隧道扰动影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(2): 396.
- ZHANG Haohao, LEI Mingfeng, LIU Linghui, et al. Study on the influence law of underpass construction of new tunnel on the disturbance of existing upper shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(2): 396.
- [7] 丁智, 吴云双, 张霄, 等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 663.
- DING Zhi, WU Yunshuang, ZHANG Xiao, et al. Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 663.
- [8] 叶建忠, 涂美吉, 邱凡. 地铁小净距叠交隧道近接施工影响的数值模拟分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 27.
- YE Jianzhong, TU Meiji, QIU Fan. Numerical simulation analysis of the interactive impact between small-clear-distance overlapped metro tunnels during construction[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(12): 27.
- [9] 詹涛. 双线盾构隧道小净距下穿时既有隧道结构的变形数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(11): 23.
- ZHAN Tao. Numerical analysis of structure deformation caused by double shield under-crossing tunnel with small clear distance[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(11): 23.
- [10] 房明, 刘镇, 周翠英, 等. 交叉隧道盾构施工与邻近不同位置建筑物的相互影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(1): 64.

FANG Ming, LIU Zhen, ZHOU Cuiying, et al. Study on interaction between undercrossing shield tunneling and adjacent structure in different distance[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(1): 64.

- [11] 金大龙, 袁大军, 韦家昕, 等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1507.
- JIN Dalong, YUAN Dajun, WEI Jiaxin, et al. Centrifugal model test of group tunneling with small spacing beneath existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1507.
- [12] 朱蕾, 赵敬妍. 盾构近距离下穿对上覆已建隧道影响的实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 656.
- ZHU Lei, ZHAO Jingyan. Monitoring data analysis of shield-driven construction undercrossing the existing tunnel in a short distance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 656.
- [13] 张琼方, 夏唐代, 丁智, 等. 盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3561.
- ZHANG Qiongfang, XIA Tangdai, DING Zhi, et al. Effect of nearby undercrossing tunneling on the deformation of existing metro tunnel and construction control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3561.
- [14] BEZUIJEN A, TALMON A. Backfill grouting research at groene hart tunnel[C]//Tongji University. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Shanghai: Tongji University, 2008:349.

(收稿日期:2022-02-28)

(上接第47页)

- [8] BYRNE P M, PARK S S, BEATY M H, et al. Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 193.
- [9] PUEBLA H, BYRNE P M, PHILLIPS R. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 641.
- [10] BOROWIEC A, STANUSZEK M. Liquefaction mechanism induced by dynamic excitation modeled in Plaxis AE with the use of UBC and MOHR-coulomb constitutive relationships[J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2016, 38(1): 123.

- [11] DEMIR S, ÖZENER P. Numerical investigation of seismic performance of high modulus columns under earthquake loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18(4): 811.
- [12] DAFTARI A, KUDLA W. Prediction of soil liquefaction by using UBC3D-PLM model in Plaxis[J]. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2014, 8(2): 106.
- [13] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(5): 421.

(收稿日期:2021-06-23)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn