

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.063>



小半径曲线隧道下地铁运行对粉砂土层引起的振动响应规律

王晓睿, 刘旭*, 张昕, 张俊然

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450045

摘要: 小曲线地铁盾构隧道位于粉细砂层中对于列车运营水平及竖向循环荷载的响应较为敏感, 特别是离心水平荷载, 而郑州大部分地层以此地质构成为主, 因此地铁在长期运营状态下, 由于粉细砂土层的动力响应导致的砂土层沉降, 给列车运行会带来较大隐患。进行了长期孔隙水监测, 并利用MIDAS有限元计算平台建立地铁道床—衬砌—土体耦合动力模型进行相互验证, 研究了单列列车运行与双向会车、不同隧道埋深时对隧道周围土层的振动响应规律。结果表明, 孔隙水压力在列车运营初期较大, 后期逐渐减小并稳定, 其中受到上下班高峰期、季节性气候, 以及地下水位的影响, 孔压可能造成小幅度上升, 但总体趋势是下降。由于荷载叠加效应, 双向列车同时经过会使孔隙水压力增幅大于单向列车运行的情况, 在隧道下方的最大沉降发生在隧道左端, 离隧道越远沉降量越小; 在地下水位一定时, 隧道埋深与孔隙水压力大小成正比, 与隧道周围土体沉降成反比。

关键词: 小半径曲线段; 粉细砂土层; 循环荷载; 孔隙水监测; 数值模拟; 工程地质。

中图分类号: TU443

文章编号: 1000-2383(2023)06-2415-12

收稿日期: 2022-12-06

Vibration Response Caused by Silt Layer in Underground Subway under Small Radius Curve Tunnel

Wang Xiaorui, Liu Xu*, Zhang Xin, Zhang Junran

School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China

Abstract: The response of the powdered sandy soil to the cyclic load in the operation of the metro in small curves is sensitive, especially the centrifugal force on the track when the train is moving particularly serious, and most areas in Zhengzhou belong to the Yellow River alluvial powdered sand layer, so the metro in long-term operation, due to the dynamic response of the powdered sandy soil layer caused by the settlement of the sandy soil layer, to train operation will bring greater potential problems. In this paper, long-term pore water monitoring was carried out, and the MIDAS finite element calculation platform was used to establish a coupled dynamic model of the metro bed-lining-soil for mutual verification, and the vibration response law of the soil around the tunnel was studied for single train operation and two-way meeting, and for different tunnel burial depths. The results show that the pore water pressure is large in the early stage of train operation, and gradually decreases in the later stage and becomes stable. Due to the influence of peak work hours, seasonal climate, and groundwater level, the pore pressure may cause a small increase, but the overall trend is to decline. the simultaneous passage of two-way trains will cause the pore water pressure to increase more than

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(No.51309100); 河南省科技攻关项目(No.222102320231)。

作者简介: 王晓睿(1975—), 男, 教授, 博士, 从事地下工程方面相关研究。ORCID: 0009-0005-0848-2352。E-mail: wxrui203@163.com

* **通讯作者:** 刘旭, E-mail: m13935182748@163.com

引用格式: 王晓睿, 刘旭, 张昕, 张俊然, 2023. 小半径曲线隧道下地铁运行对粉砂土层引起的振动响应规律. 地球科学, 48(6): 2415—2426.

Citation: Wang Xiaorui, Liu Xu, Zhang Xin, Zhang Junran, 2023. Vibration Response Caused by Silt Layer in Underground Subway under Small Radius Curve Tunnel. *Earth Science*, 48(6): 2415—2426.

in the case of one-way train operation due to the load superposition effect, the maximum settlement below the tunnel occurs at the left end of the tunnel, the further away from the tunnel the smaller the settlement; at a certain water table, the tunnel burial depth is positively proportional to the pore water pressure magnitude, and inversely proportional to the settlement of the soil around the tunnel.

Key words: small radius curve section; fine sand layer; cyclic load; pore water monitoring; numerical simulation; engineering geology.

0 引言

郑州处于黄河中下游地区,地层中的粉细砂土分布更为广泛,在列车循环荷载作用下,可能产生沉降并长期发展.沉降过大将危害隧道安全性,影响其正常使用,因而必须严格控制沉降量(葛世平和姚湘静,2015;王晓睿等,2019,2022;任磊等,2021).而地铁列车荷载属于长期往复施加的循环荷载,通过轨道、道床传导到盾构管片组成的隧道结构,再传至土层,尤其是粉砂土这类对振动反应敏感的土层影响较大.在振动荷载作用下导致粉细砂土层中孔压增加,有效应力降低,从而使土体的抗剪强度降低(周军和卢岱岳,2020).小半径曲线隧道由于存在曲率半径、离散支撑、超高等因素,相比直线隧道,小半径曲线隧道对土体变形、地下水渗流及邻近建筑物稳定性等周边环境的影响更为突出(王永刚,2020).

目前针对列车振动荷载作用下土的孔隙水压力以及振动响应的发展规律国内外学者进行了大量的研究,周扬等(2022)采用室内实验与数值模型相结合的方法,以孔隙水压力与峰值加速度为评价指标,研究列车振动荷载作用下孔隙水压力的响应规律以及盾构隧道周围土体动力响应;王涛等(2020)以南京地铁为例,对地铁列车荷载作用下粉细砂地层的动力响应特征及长期累积变形发展规律进行了研究;李子豪(2022)采用循环三轴压缩实验,研究钙质砂在循环荷载作用下的累积变形问题,分析了初始静偏应力比和动偏应力比对土体动力响应的影响;EyyubKarakan and AlperSezer (2019)采用循环三轴压缩试验对有限液化($Ru < 0.5$)的淤泥的液化后循环行为进行了评估并考虑循环加载(双循环)引起的超孔隙水压力及其对正弦加载下粉砂不排水动力行为的影响—粉砂是否受到有限液化;Yang *et al.* (2018)利用室内模型实验分析了衬砌不同的连接方式下长期列车振动载荷

对土体的动力响应;周念清等(2006)和张曦等(2007)通过现场监测孔隙水和土压力的方法研究地铁振动荷载作用下孔隙水压力增长和消散以及土体动力响应变化规律,并提出了土体动力响应衰减计算公式.

综上所述,列车振动荷载作用对土体变形的影响受到学者的关注,但现有文献中多以直线段为研究对象进行室内模型实验、现场监测或直接进行数值模拟,而针对曲线段将孔压实测数据与数值模拟计算结果结合进行充分分析的研究较少.本文通过对小半径曲线段地铁振动引起的下卧土层孔隙水压力增长消散情况进行现场测试,研究孔压对振动荷载的响应特征,并建立地铁道床—衬砌—土体耦合动力模型,研究粉砂土层中单列列车与双向会车时以及不同隧道埋深对曲线隧道周围孔隙水压力和土体动力响应的影响,总结其中规律,为地铁列车运行的安全性评价提供基础.

1 工程背景

本次监测区域位于农业南路站—东风南路站区间,隧道先后穿越粉土和粉砂地层,该区段为小半径曲线段且隧道周围土体动力响应特征非常明显,越靠近隧道,响应幅值越大,主要影响范围在隧道底部0~15 m处(王永刚,2020).该区域目前在列车循环荷载作用下已造成60~80 mm沉降,是由于本监测区段下卧层存在着粉细砂等易液化的土层,在长期列车振动荷载作用下,可能导致下卧层土体产生液化,而粉砂土液化会导致下卧层土体沉降过大,下卧层土体沉降过大将会加剧轨道的不平顺,增大列车动荷载.该区段隧道埋深15~20 m,地下水主要赋存于约9.0 m以下粉质粘土、粉砂、粉土地层中.各测向点位与隧道的位置关系见图1,距隧道布置深度如表1所示,地质剖面图见图2.

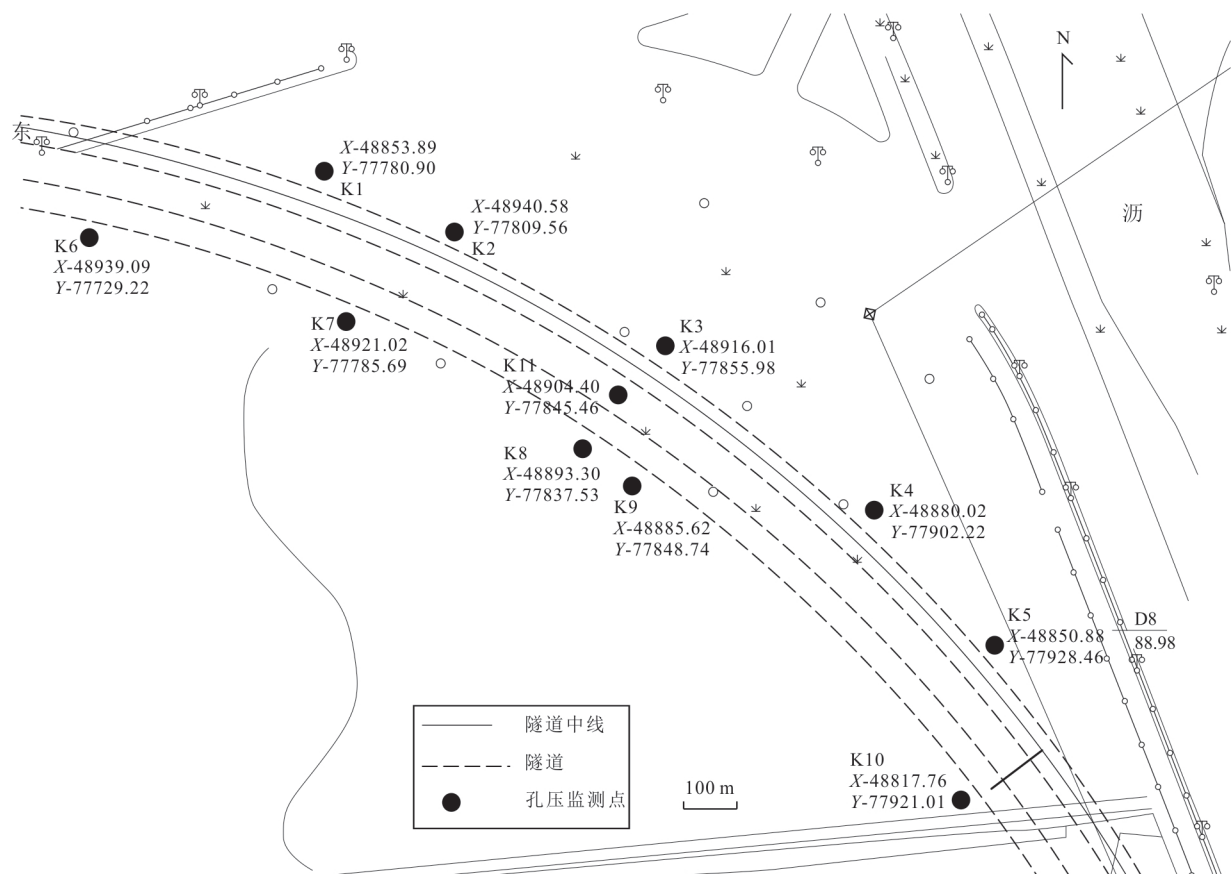


图1 监测点平面布置

Fig.1 Plan of monitoring site

表 1 监测点距隧道布置深度

Table 1 Depth between monitoring points and tunnel layout

监测点	监测点距区间隧道外轮廓平面净距(m)	孔底距隧道底板间距(m)	监测点 孔深(m)	监测方式
K1	4.8	0.5	21.5	自动
K2	3.6	0.9	21.5	人工
K3-1	4.6	0.6	20.0	人工
K3-2	4.6	3.6	23.0	自动
K3-3	4.6	8.6	28.0	自动
K3-4	4.6	18.6	38.0	自动
K4	4.8	0.8	19.0	人工
K5	3.3	0.8	18.0	自动
K6	3.7	0.5	21.5	人工
K7	3.9	0.9	21.5	人工
K8	4.4	0.5	20.0	人工
K9	3.8	0.6	19.0	人工
K10	3.6	0.6	18.0	人工
K11-1	4.0	0.5	20.0	人工
K11-2	4.0	3.5	23.0	人工
K11-3	4.0	8.5	28.0	人工
K11-4	4.0	18.5	38.0	人工

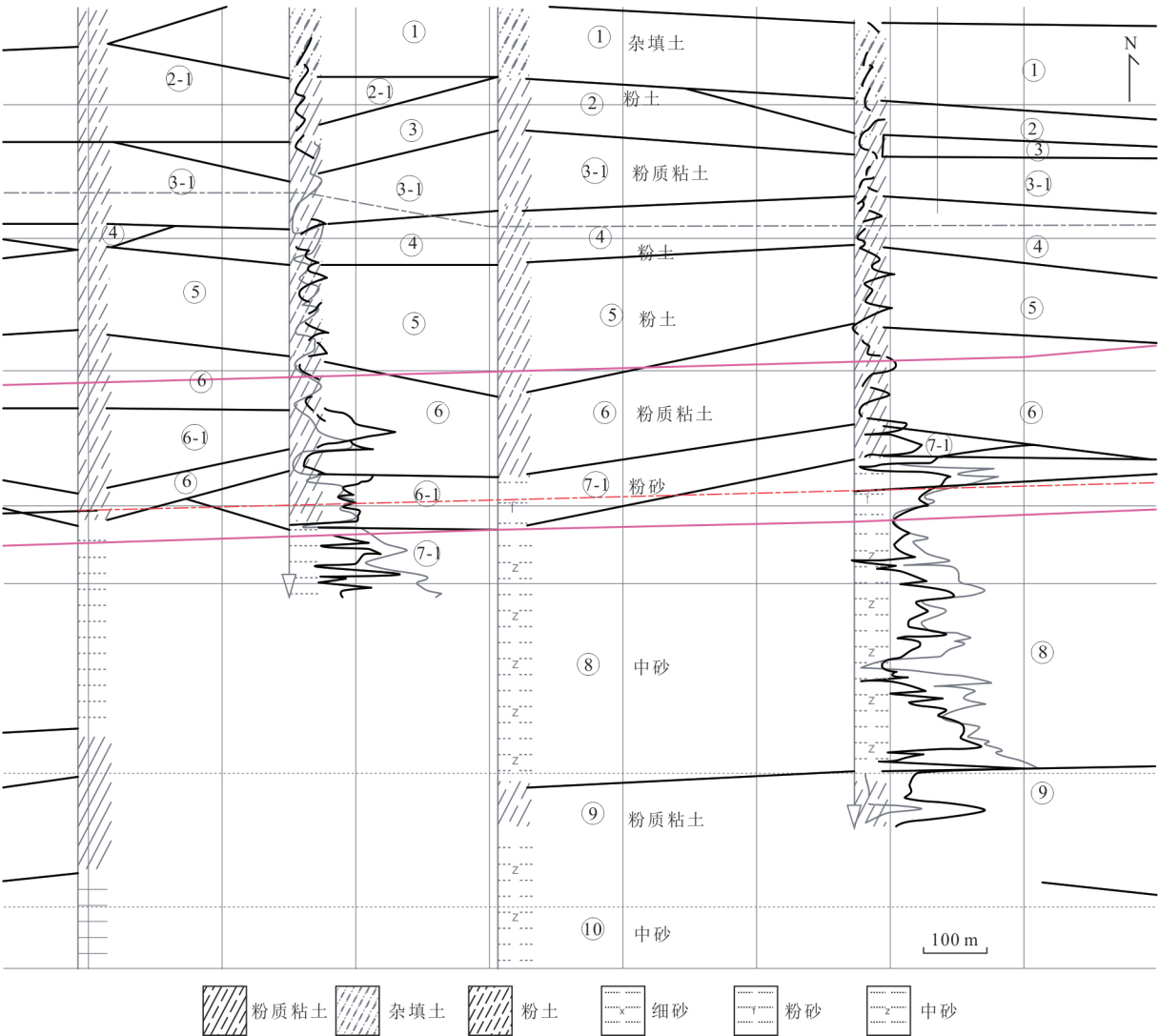


图2 地质剖面图

Fig.2 Map of geological profile

2 现场实测分析

2.1 孔隙水压力响应分析

由于一号线已开始运营,本实验拟在隧道底部同水平面上沿地铁线路布置11个点,并选取两个点K3和K11根据2013年《孔隙水压力测试规程》(CECS55-93)进行分层布设,增加布设竖向观测点各3个,得到不同深度孔隙水压力的数据。

郑州地铁1号线采用6节编组,每节车厢长约25 m,运行速度60~70 km/h,列车间隔时间5~8 min,到站停留30~40 s.第一班列车大约在当日6:04开始运行,在6:17至6:20到达监测点,随后被仪器检测到孔压反应.现以4月10日为例,选取隧道左线深度为28 m处(拱底位置)自动化监测点K3-3时的监测数据进行说明,如图3所示。

图3为早中晚高峰期3个时间段孔压变化曲线,可以看出当列车荷载施加后,短时间内孔隙水压力迅速上升,孔隙水压力变化曲线的每个峰值与列车振动产生的轮轨激振力相对应,但有一定的相位滞后,在7点和19点左右,孔隙水压力变化幅度较大,待列车停运后(0:00至1:00)随着列车荷载作用的消失,孔隙水压力开始消散.这是由于在白天里地铁处于运行状态,对地下土体施加了振动荷载,导致孔隙水压力上升,随后随着地铁班次的减少,土体受到的荷载影响也逐渐减小,从而孔压逐渐消散,由于夜里温度下降,水位上升,从而监测点的孔压会呈现小幅波动的情况。

图4a~4c分别为自动化监测点、人工监测点孔压变化曲线以及地下水位变化曲线,可以看出所有监测点孔压和地下水位整体处于缓慢下降趋势,在

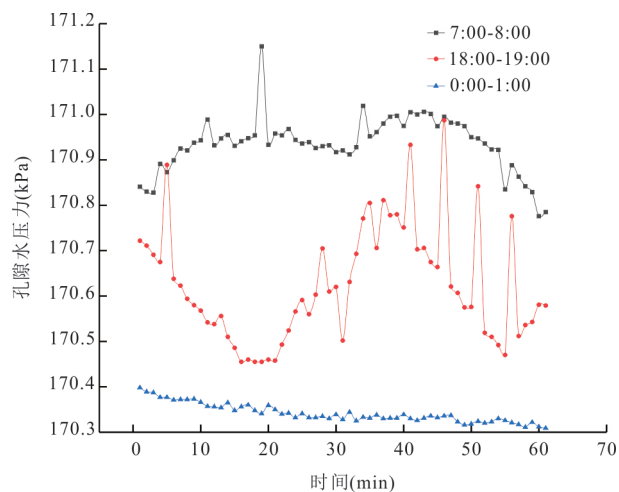


图3 不同时间段下孔压变化曲线

Fig.3 Change curve of lower pore pressure in different time periods

运营前期孔压波动幅值较大,之后趋于稳定.在5个自动化监测点中,K3-2、K3-3、K3-4监测点随埋置深

度孔压逐渐上升,且离隧道越近监测点孔压变化越大.在12个人工监测点中,K2、K4、K6、K7、K8、K9、K10和K11-4监测点在4月中旬到5月中旬期间孔压呈现出上浮和下降的波动发展趋势,之后又逐渐稳定下降,其余4个点在此期间整体上均呈现缓慢下降趋势.从图4c地下水位变化曲线可以看出5个自动化监测点和12个人工监测点的孔压值有时会受季节性气候影响,例如雷雨天气、气温降低或是气候炎热,随地下水位上升,孔压也会出现上升的趋势,但变化幅度基本很小,孔压的整体发展趋势是下降的.图4d为12个人工监测点的监测值与所检测到的水位高差产生的超孔隙水压力变化曲线,可以看出超孔压在多数时间里基本稳定在0.7 kPa以内,只有K9和K10监测点以及在监测前期各点有时会产生相对较大超孔隙水压力,在监测后期超孔压逐渐稳定并消散,这是由于列车振动开始时产生的孔隙水压力不易消散和转移,会产生较大的体

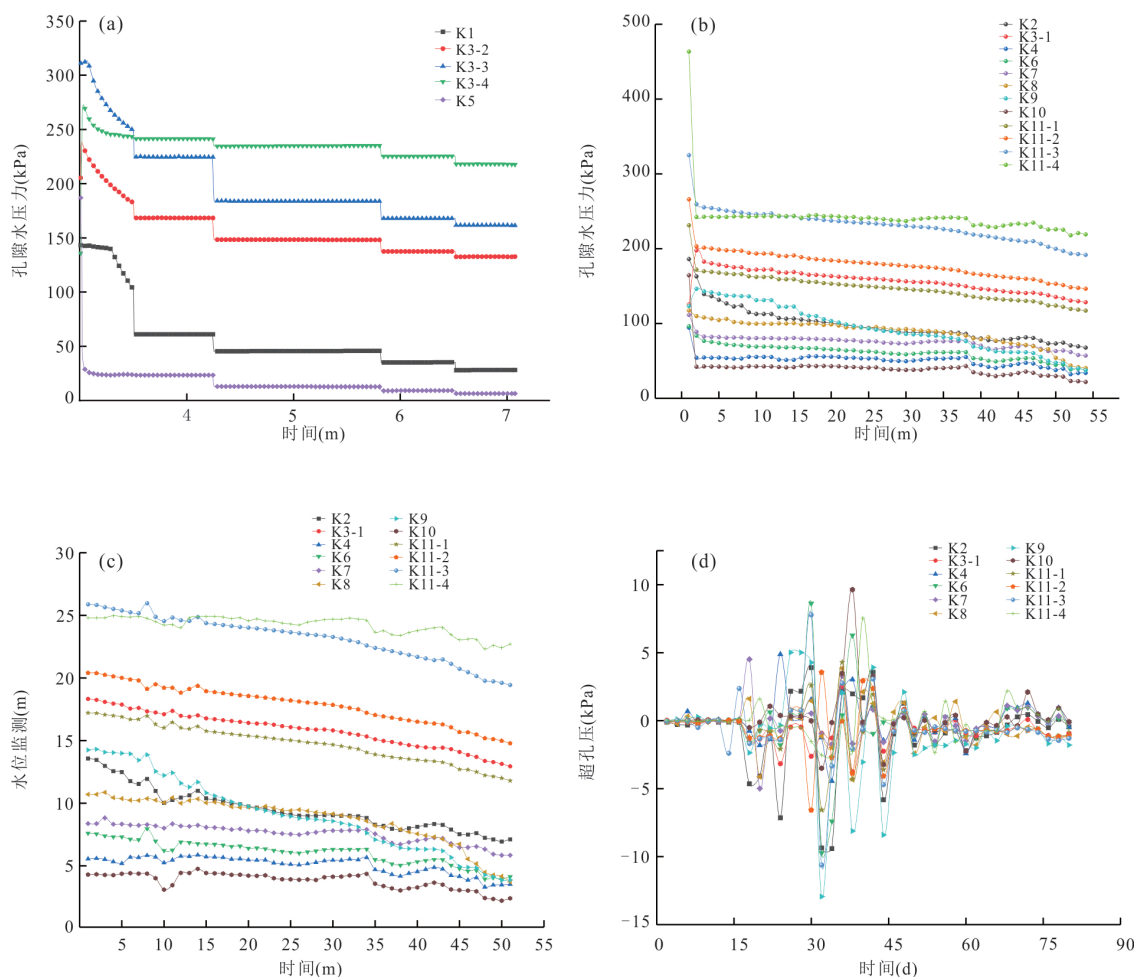


图4 不同工况下孔压变化曲线

Fig.4 Hole pressure change curves under different working conditions

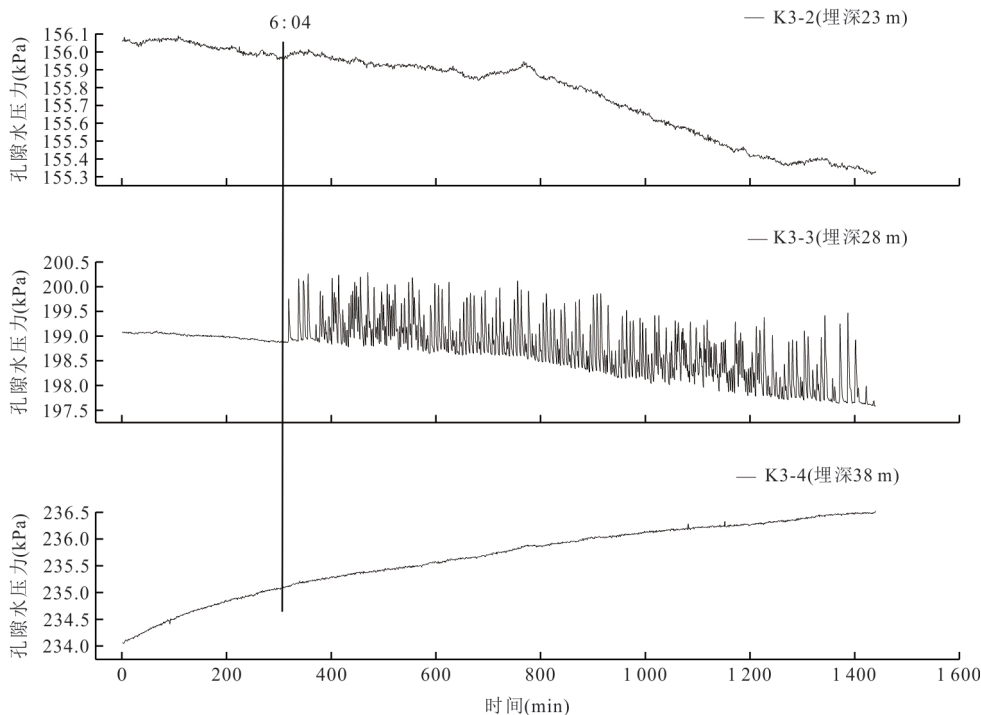


图 5 不同埋深下孔压变化曲线图

Fig.5 Variation of pore pressure at different burial depths

变势,导致初始孔压值迅速上升,但由于粉细砂土颗粒细小会存在少量的粘粒,使得土层具有一定的结构强度和粘聚力,限制了体变势的进一步增大,致使后期的孔压增长较缓慢,直至趋于稳定(王明飞,2009).

2.2 孔压随埋深的变化

地铁列车共 6 节车厢,整车长 118 m,最高速度是 80 km/h.列车运行过程中,埋设在不同深度的孔隙水压力计对地铁振动产生的孔隙水压力变化具有不同的响应情形.

选取在不同埋深下的 3 个监测点(K3-2、K3-3、K3-4),分析在一天中孔压变化情况对隧道下卧土体的影响,如图 5 所示.

图 5 是以 2021 年 4 月 20 日为例,列车在当日 6:04 开始运行,在 6:17 至 6:20 到达监测点,随列车振动荷载的施加,埋深在 23 m 的监测点(K3-2)小幅度波动,在 23:00 列车停运后孔压逐渐下降,埋深在 28 m 的监测点(K3-3)在短时间内孔压迅速产生并急剧上升,波动幅度与列车振动频率相符合且在列车停运后,孔压没有急剧下降只是维持平稳状态.埋深在 38 m(K3-4)孔压随时间缓慢上升,可以看出,隧道下卧层土体在列车振动荷载下,孔压在短期内是不易消散的.

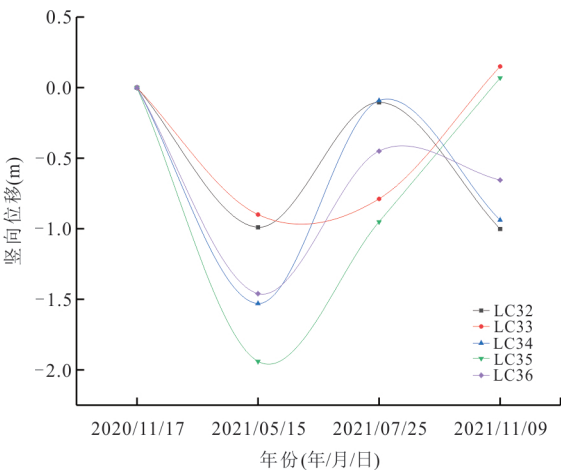


图 6 各期隧道沉降变化量

Fig.6 Tunnel settlement variation in each phase

综上所述,可以得出在列车循环荷载作用下,隧道周围粉砂土对列车振动的反应和位置密切相关,离隧道越近反应越敏感,隧道拱腰上部超出一定埋深范围之后随振动作用力的消失孔压也迅速下降,在隧道拱腰下部的土层随振动作用的消失孔压在短期内是不易消散的.

2.3 地面沉降监测分析

图 6 为 2020 年 11 月至 2021 年 10 月期间农业南路—东风南路曲线段区间的隧道沉降变化曲线,其

中 2021 年 5 月至 2021 年 10 月期间的沉降变化量对应孔压监测期。由图 6 可知,曲线隧道在运营期前期沉降达到 2 mm,且区间隧道沉降变形明显不均匀,在孔压监测期内沉降逐渐减小达到 1 mm 以内,说明在列车振动荷载作用达到一定次数下隧道沉降逐渐减小并达到稳定。

3 计算模型的建立及列车荷载的施加

3.1 计算模型的建立

本文采用数值模拟软件 MIDAS 进行建模,列车运行引起的振动属于半无限空间作用(图 7)。由于曲线隧道在水平方向距隧道轴线 50 m 范围内,水平向振动是竖向振动强度的 2~4 倍(袁扬等,2012)并与其他有限元模拟软件的帮助文件认为,当单元的尺寸为考虑波长的 1/20 时,可以忽略计算误差。

综合以上研究成果和本项目的实际工程,根据郑州地铁 1 号线测试区间隧道段的土层分布情况,本文整体模型尺寸为:90 m×60 m×68.3 m($X \times Y \times Z$)。其中隧道直径为 7 m、埋深为 15 m。为了在有限的计算区域内获得精确结果,模型底部采用固定条件,顶部不设置约束,四周采用自由场边界。并在各土层分界处设置排水边界,隧道衬砌内侧与土体接触处设置为不透透边界。为避免波在边界面处

反射,两侧采用黏弹性边界。并对几何模型进行有限元网格划分,划分网格时采用稀度控制,离隧道轴线越近网格较为精密,反之,则较为稀疏。根据本项目的试验报告,并综合地勘报告参数,获得表 2 所示的土体参数表。

3.2 列车荷载的施加

根据郑州地铁一号线路所选用 B 型列车以及地铁设计规范 GB50157-2013(王丽红和卢桂云,2013),本文考虑最高运行速度且列车满载的情况并根据列车振动荷载特点将列车荷载分为竖向荷载和水平荷载以及轨道超高引起的离心力(王晨阳等,2018)施加在道床上,并根据 MIDAS 数值模拟软件将列车荷载施加到道床上得到隧道转弯半径 $R=350$ m 时 5 s 的列车振动载荷曲线图(如图 8 所示)。

4 粉细砂地层动力响应规律

4.1 计算结果与实测结果对比

通过 MIDAS 软件输入土体土力学参数并施加列车移动荷载来进行模型可靠性验证分析。

根据地铁道床—衬砌—土体耦合动力模型模拟结果,孔隙水压力模拟值如图 9b 所示,数值模型模拟结果与实测结果变化趋势基本相同,表明数值

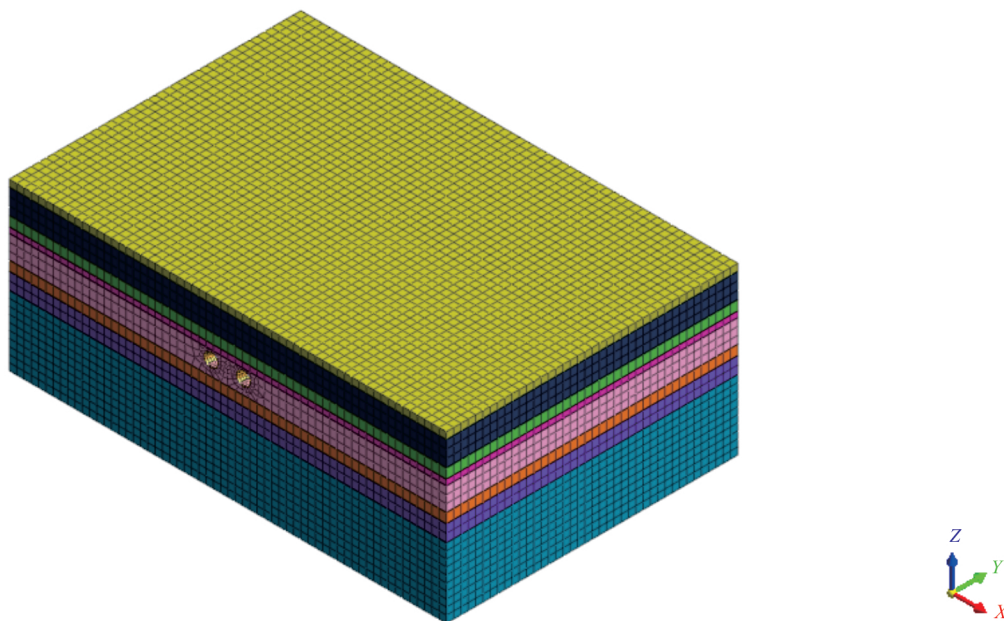


图 7 计算模型

Fig.7 Calculates models

表 2 土层物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层 编号	土层名称	厚度(m)	压缩模量(MPa)	泊松 比 μ	重度(KN/m ³)	内摩擦 角(°)	黏聚力 (kPa)	渗透系数(m/s)
1	粉质粘土	2.885	16.0	0.37	17.0	18	10	5.8×10^{-6}
2	粉土	10.095	10.9	0.30	19.6	20	14	5.8×10^{-6}
3	粉质粘土	4.040	7.0	0.30	19.2	10	19	5.8×10^{-7}
4	粉砂	2.347	17.0	0.30	20.2	24	0	1.2×10^{-4}
5	中砂	9.510	41.5	0.25	20.8	31	0	2.4×10^{-4}
6	粉质粘土	4.028	13.9	0.25	0.2	13	22	5.8×10^{-6}
7	中砂	6.775	40.0	0.25	20.8	30	0	2.4×10^{-4}
8	粉质黏土	5.350	27.4	0.30	20.1	14	16	5.8×10^{-6}
9	衬砌	0.300	36 000	0.20	2 500	/	/	/
10	道床	0.440	34 500	0.20	2 500	/	/	/

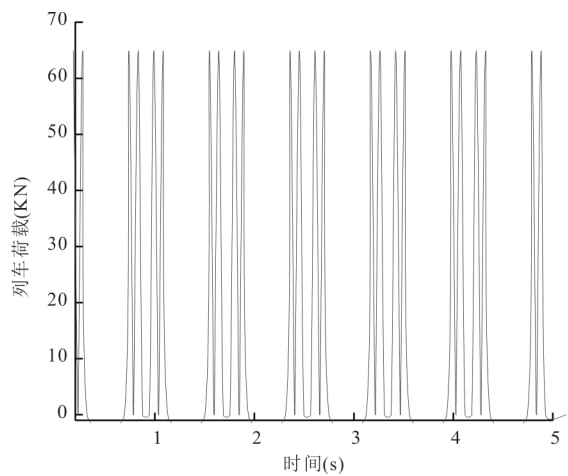


图 8 列车振动荷载曲线图($v=80\text{ km/h}$)
Fig.8 Train vibration load curve diagram ($v=80\text{ km/h}$)

模型能够较好地反映地铁振动引起的下卧土层孔隙水压力增长消散情况。

4.2 单列列车、双向会车对土体的影响

在列车运营期间,会出现单列列车通过隧道区间和双向列车相会时的两种工况.为分析两种工况对土体的影响,分别在隧道上部与下部设置监测点,得到隧道周围土层中的孔压变化曲线如图 10 所示.可以看出在隧道上部土层中,列车经过隧道的前 4 s 内,两列列车交会时的孔压明显高于单列列车经过时的孔压,且单列列车通过隧道时孔压涨幅 1.454 kPa,两列列车交会时土体孔压的涨幅约 1.538 kPa,待列车驶过后孔压急剧下降;在隧道下方土层中,在列车经过的前 6 s 内双向列车交会时的孔压始终高于单列列车时的孔压,且单列列车通过时孔压的涨幅约为 0.007 kPa,双向会车时土层孔压

涨幅约 0.019 kPa,在列车驶过后,孔压还在小范围的上下波动,随后稳定.可以得到隧道下方的土体受列车荷载影响略大,列车经过后孔压下降但还在波动,这是由于短时间内列车振动效应使土体体积减小,而且短时间内孔隙水难以排出导致孔隙水压力小幅度波动,且在列车振动荷载下双向列车相会相比于单列列车通过时,会出现荷载叠加效应,使得双向会车时土层中的孔压略高一些.

图 11a 和图 11b 分别为隧道上方和下方拾振点的竖向位移时程曲线,可以看出在隧道上方,与单次列车运行比较,双向列车运行时的沉降差较大,两种情况中相同点的沉降差在起始端为 0.15 mm,沿左侧隧道中心线距离逐渐增加.在隧道下方的最大沉降发生在隧道左端,且双向会车与单列列车通过时的起始沉降差值为 0.27 mm,离隧道越远沉降量越小.可以得到在运营期间,两列列车交会对左侧隧道周围土层存在少许影响,但在可控范围之内.

4.3 不同隧道埋深的影响

隧道埋深随地铁盾构区间的延伸也大多不同,且埋深可能与列车运行诱发的土体振动大小有关.针对地铁不同隧道埋深的情况,现研究列车振动荷载下隧道周围粉砂土层中的孔隙水压力和位移影响规律.在保证地下水位一定以及隧道埋深不会因振动上浮的前提下,分别以隧道埋深为 10 m、20 m、25 m 三种情况进行分析.进而得到在地铁列车振动荷载作用下周围粉砂土层孔隙水压力变化以及位移变化的时程曲线如图 12 和图 13 所示.

从图 12 可以看出在列车振动荷载作用下隧道埋深与孔压大小成正比,当隧道埋深为 10 m 时,隧道上部土层孔隙水压力涨幅为 9.562 kPa;埋深为

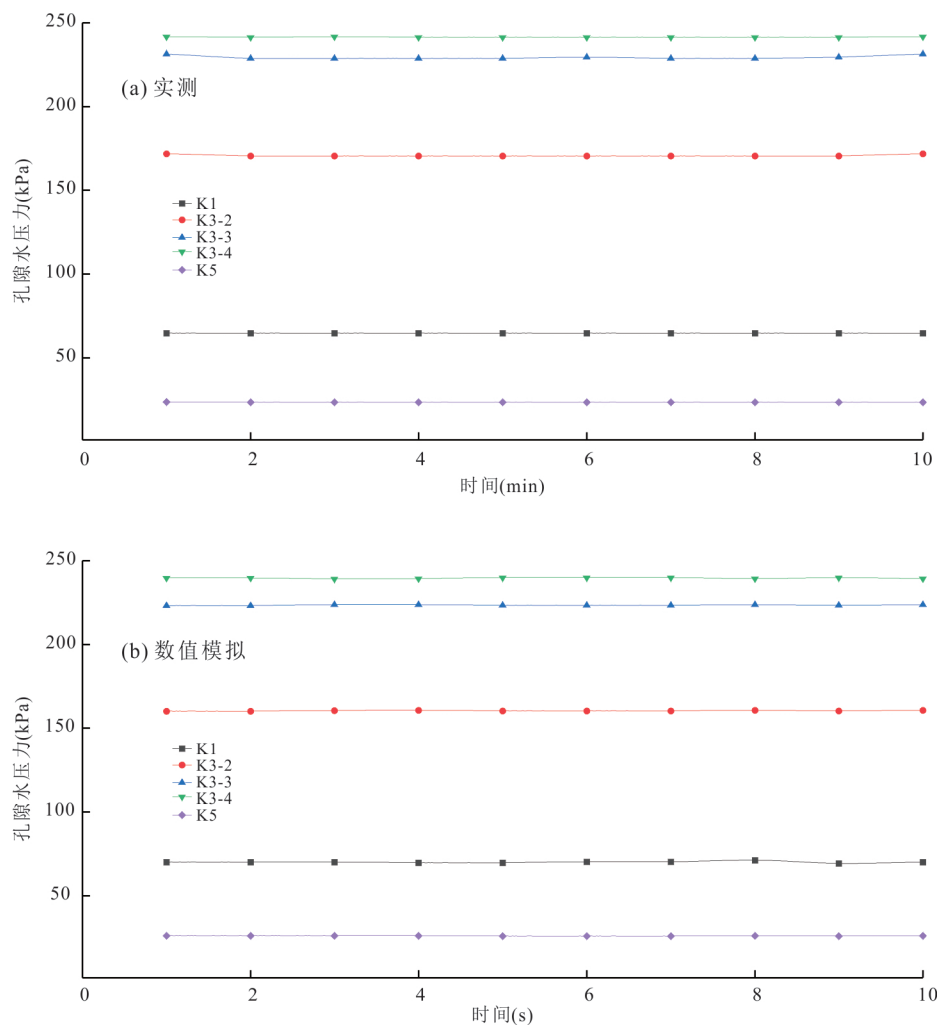


图 9 实测与模拟结果对比

Fig.9 Comparison of the measured and simulation results

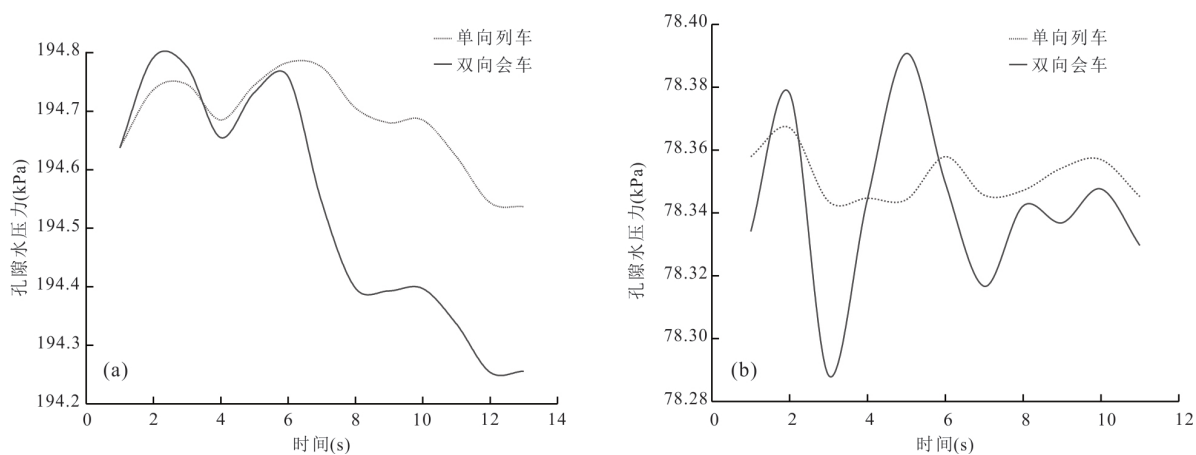


图 10 隧道周围土层孔隙水时程变化曲线

Fig.10 Time course variation curves of soil layer pore water around the tunnel

a. 隧道上部土层监测点; b. 隧道下部土层监测点

20 m 时,孔压涨幅为 0.085 kPa;埋深为 25 m 时,孔压增幅为 5.470 kPa;在隧道底部时,孔隙水压力在

埋深为 10 m、20 m、25 m 情况下分别增加 0.542 kPa、2.614 kPa、4.961 kPa,说明当隧道埋深

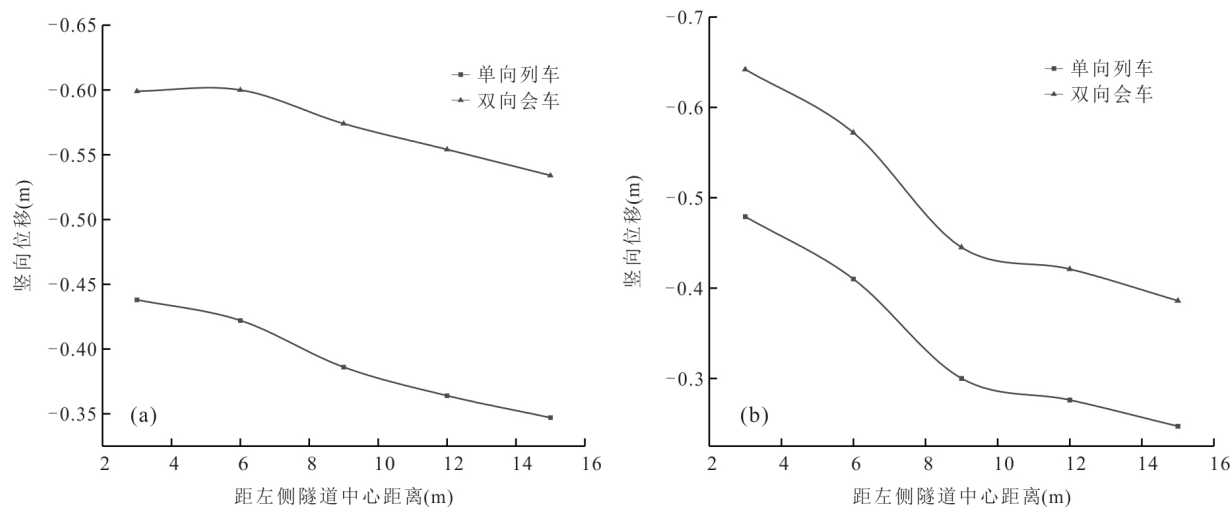


图 11 隧道周围土体位移变化图
Fig.11 Map of soil displacement around tunnel
a.隧道上部土层监测点; b.隧道下方土层监测点

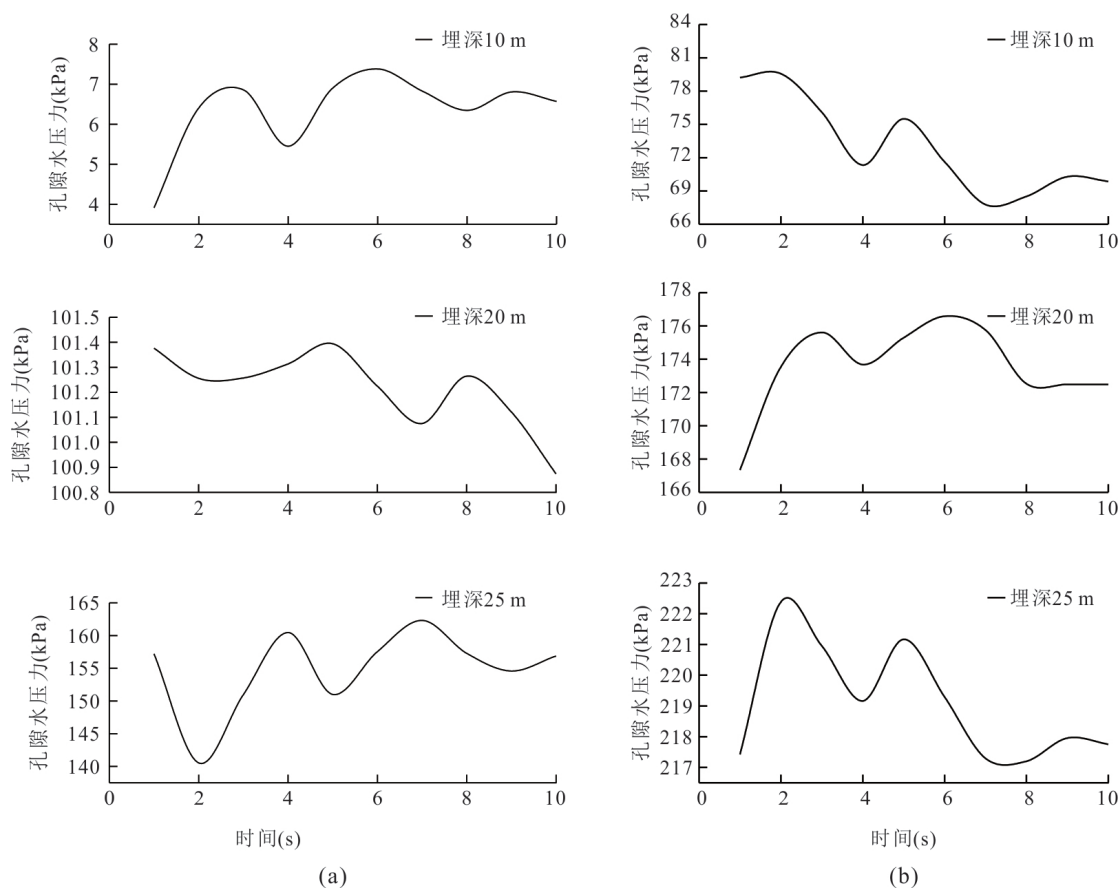


图 12 不同隧道埋深下孔压的变化
Fig.12 Changes of hole pressure under different tunnel buried depths
a.隧道上部土层监测点; b.隧道下方土层监测点

增加时,其孔隙水压力也随之呈增长趋势.且当隧道埋深较浅时,在列车通过监测点后孔隙水压力反而较小,这是由于列车经过隧道后埋深较浅的土体

会有一定上浮,导致孔隙水压力较小,而当埋深较大时,土体初始孔压力较大,当列车经过后孔隙水压力一时无法快速消散.通过对孔隙水压力分析,

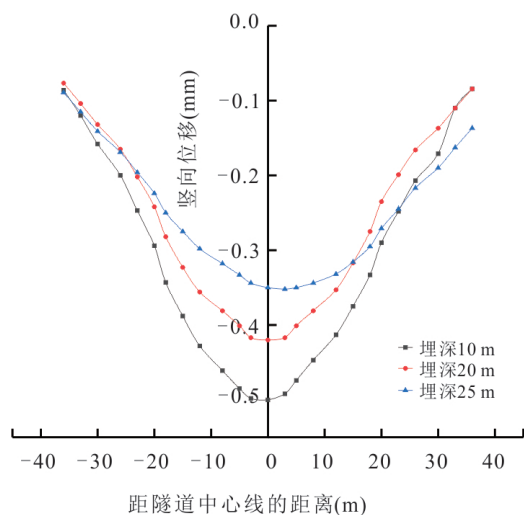


图13 不同隧道埋深下位移的变化

Fig.13 Change of displacement under different tunnel burial depths

埋深为10 m时,超孔隙水压力主要集中在隧道上侧衬砌附近以及隧道下方中砂和粉砂层中,埋深为20 m时,超孔压主要集中在两隧道之间及隧道下方中砂中,埋深为25 m时,超孔压主要集中在隧道衬砌周围以及隧道下方粉质黏土中,可以看出,随隧道埋深的增大超孔压有一定程度地增加,但其值远小于1,不足以使砂土层产生液化。

从图13可以看出随着盾构地铁隧道埋深的增加,列车振动对隧道周围土层的影响略显降低。当隧道埋深由10 m变成20 m时,地表竖向位移相应的由-0.5 mm变为-0.42 mm,衰减梯度为-0.08 mm/m。隧道埋深由20 m变为25 m时,地表竖向位移由-0.42 mm变为-0.35 mm,衰减梯度为-0.07 mm/m,为10~20 m埋深范围内衰减梯度的0.86倍。可见隧道周围土体沉降的大小随着隧道埋深的增大而减小,这是由于埋深越大,土体的抗变形能力越大,列车振动产生的荷载对隧道结构影响越小;同时由于土拱效应和洞的极限跨度、土体参数以及上覆土厚度 H 之间的关系,盾构隧道的埋深越大,土拱效应越大,盾构隧道在列车振动荷载作用下产生的纵向位移越小(马伟凯,2020)。

5 结论

(1)孔隙水压力在列车运营初期较大,后期逐渐减小并稳定,其中受到上下班高峰期、季节性气候,以及地下水位的影响,孔压可能造成小幅度上升,但总体趋势是下降。且在粉细砂土层中超孔隙

水压力值大多数0.7 kPa,且基底超孔隙水压力最大值随着时间的增加达到稳定后消散。

(2)曲线隧道在运营期前期沉降达到2 mm,且区间隧道沉降变形明显不均匀,在孔压监测期内沉降逐渐减小达到1 mm以内,说明在列车循环荷载作用下沉降逐渐减小并达到稳定。

(3)由于荷载叠加效应,双向列车同时经过会使孔隙水压力增幅大于单向列车运行的情况,隧道上方孔压在列车经过后迅速衰减,而隧道下方孔压在列车驶过后还在小范围地波动,可见隧道下方土层较为敏感。在隧道下方的最大沉降发生在隧道左端,且双向会车与单列列车通过时的起始沉降差值为0.27 mm,离隧道越远沉降量越小。

(4)在地下水位一定时,隧道埋深和孔隙水压力成正比;与隧道周围土体沉降成反比。且随隧道埋深的增大超孔压大小也随之增长,但其值远小于1,粉砂土层发生液化的可能性较低。

References

- Karakan, E., Sezer, A., Tanrinian, N., 2019. Evaluation of Effect of Limited Pore Water Pressure Development on Cyclic Behavior of a Nonplastic Silt. *Soils and Foundations*, 59(5): 1302–1312. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.05.009>
- Ge, S. P., Yao, X. J., 2015. Response Characteristics of Pore Pressure in Soils nearby Metro Tunnel Due to Train Vibration Loading. *Journal of Engineering Geology*, 23(6): 1093–1099(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., 2022. Study on Cumulative Deformation of Calcareous Sand under Cyclic Load. Guangdong University of Technology, Guangzhou(in Chinese with English abstract).
- Ma, K. W., 2020. Analysis of Subway Train Vibration Response in Sand Stratum (Dissertation). Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang(in Chinese with English abstract).
- Ren, L., Zhu, Y., Cui, T. L., 2021. Study on Protection Scheme of Shield Tunnel Passing through Railway Bridge Pile at a Short Distance. *Earth Science*, 46(6): 2278–2286(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Zhao, J. Z., Xu, X., et al., 2018. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Wheel-Rail Contact for Curved Subway. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 31(2): 36–42(in Chinese with English abstract).
- Wang, L. H., Lu, G. Y., 2013. Vehicle Type Selection for

- Zhengzhou Metro Line 1. *Urban Rapid Rail Transit*, 26(3):119—123(in Chinese with English abstract).
- Wang, M. F., 2009. Dynamic Response of Saturated Silt Soil and Liquefaction by the Subway's Vibration (Dissertation). Beijing Jiaotong University, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Shi, B., Ma, L. X., et al., 2020. Dynamic Response and Long-Term Cumulative Deformation of Silty Sand Stratum Induced by Metro Train Vibration Loads. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1378—1385(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Cai, S., Yang, W., et al., 2022. Influence of Existing Buildings on Construction of Earth Pressure Shield in Extremely Soft Rock Stratum. *Earth Science*, 47(4): 1483—1491(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Jiang, H. J., Zhu, K., et al., 2019. Research on Ground Settlement Laws of Urban Subway Tunnel Construction Process Based on Earth Pressure Shield. *Earth Science*, 44(12):4293—4298(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. G., 2020. Study on Dynamic Response and Long-Term Settlement of Curved Tunnel under Vibration-Load of Train in Silty Strata (Dissertation). Henan University of Technology, Zhengzhou(in Chinese with English abstract).
- Yang, W. B., Li, L. G., Shang, Y. C., et al., 2018. An Experimental Study of the Dynamic Response of Shield Tunnels under Long-Term Train Loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 79: 67—75. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.031>
- Yuan, Y., Liu, W. N., Liu, W. F., 2012. Propagation Law of Ground Vibration in the Curve Section of Metro Based on In-Situ Measurement. *China Railway Science*, 33(4): 133—138(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Tang, Y. Q., Zhou, N. Q., et al., 2007. Dynamic Response of Saturated Soft Clay around a Subway Tunnel under Vibration Load. *China Civil Engineering Journal*, 40(2):85—88(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Lu, D. Y., 2020. Liquefiable Sandy Settlement Characteristics Analysis under Metro Train Vibration Load. *China Civil Engineering Journal*, 53(Suppl. 1): 226—232(in Chinese with English abstract).
- Zhou, N. Q., Tang, Y. Q., Wang, J. X., et al., 2006. Response Characteristics of Pore Pressure in Saturated Soft Clay to the Metro Vibration Loading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(12): 2149—2152(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Yang, W. B., Yang, L. L., et al., 2022. Analysis of Dynamic Response Characteristics of Shield Tunnels in Water-Rich Soft Strata under Train Loads. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(5): 1067—1080(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 葛世平, 姚湘静, 2015. 地铁振动荷载下隧道周边土体孔压响应特征研究. *工程地质学报*, 23(6):1093—1099.
- 李子豪, 2022. 循环荷载作用下钙质砂的累积变形规律研究 (硕士学位论文). 广州: 广东工业大学.
- 马伟凯, 2020. 砂土地层地铁列车振动响应分析 (硕士学位论文). 石家庄: 石家庄铁道大学.
- 任磊, 朱颖, 崔天麟, 2021. 盾构超近距离侧穿铁路桥桩保护方案探讨. *地球科学*, 46(6):2278—2286.
- 王晨阳, 赵吉中, 徐祥, 等, 2018. 地铁曲线段轮轨接触三维有限元分析. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 31(2): 36—42.
- 王丽红, 卢桂云, 2013. 郑州地铁 1 号线车辆选型. *都市快轨交通*, 26(3):119—123.
- 王明飞, 2009. 地铁列车振动引起饱和粉土地基动力响应及液化 (硕士学位论文). 北京: 北京交通大学.
- 王涛, 施斌, 马龙祥, 等, 2020. 粉细砂地层对地铁列车荷载的动力响应及长期变形研究. *工程地质学报*, 28(6): 1378—1385.
- 王晓睿, 蔡松, 杨伟, 等, 2022. 既有建筑对极软岩地层中土压盾构的施工影响. *地球科学*, 47(4):1483—1491.
- 王晓睿, 姜洪建, 朱坤, 等, 2019. 基于土压盾构的城市地铁隧道构筑过程地表沉降规律. *地球科学*, 44(12):4293—4298.
- 王永刚, 2020. 粉砂地层中列车振动荷载下曲线隧道的动力响应及长期沉降研究 (硕士学位论文). 郑州: 河南工业大学.
- 袁扬, 刘维宁, 刘卫丰, 2012. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律. *中国铁道科学*, 33(4):133—138.
- 张曦, 唐益群, 周念清, 等, 2007. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究. *土木工程学报*, 40(2): 85—88.
- 周军, 卢岱岳, 2020. 可液化砂土地铁列车振动作用下沉降特性分析. *土木工程学报*, 53(增刊 1):226—232.
- 周念清, 唐益群, 王建秀, 等, 2006. 饱和粘性土体中孔隙水压力对地铁振动荷载响应特征分析. *岩土工程学报*, 28(12):2149—2152.
- 周扬, 杨文波, 杨林霖, 等, 2022. 车致振动荷载作用下富水软弱地层中盾构隧道动力响应分析. *岩石力学与工程学报*, 41(5):1067—1080.