文章编号:1674-2974(2024)09-0066-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024088

不同埋深下类矩形与圆形隧道施工诱发土体变形透明土试验对比研究

杨明辉†,肖建勋,杨涛
(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:类矩形隧道因其内部空间优势在工程中逐步得到推广,但其施工引发周边土层变化规律与常规圆形隧道的差异尚缺乏深入研究,且该差异与隧道埋深紧密相关.为此自主设计组装了类矩形与圆形隧道开挖装置,以透明土模拟周边土层,并采用粒子图像测速(PIV)技术精准测定土层变形,对不同埋深下等面积类矩形与圆形隧道动态开挖过程中诱发上覆土体变化规律进行了深入分析.试验对比结果表明,两类隧道引发上覆土层变形的滑裂面基本一致,大致符合太沙基理论的竖直滑动面假定,滑裂角θ约等于$45^\circ+\varphi/2$;不同埋深情况下,圆形隧道上覆土层竖向变形始终保持“V”型的正态分布,即存在最大值,而类矩形隧道随着地层深度的增加,上覆土层变形由“V”型转变为“W”型,即存在多个沉降最值,表明该类隧道比圆形隧道地层变形更为均匀,且在相同埋深情况下类矩形隧道开挖引发的地表沉降最大沉降值小于圆形隧道,该现象在浅埋状态下尤为明显,二者差异随着埋深增大逐渐缩小,该结论可为施工方案设计选择提供参考.

关键词:类矩形隧道;土体变形;透明土;PIV技术
中图分类号:TU411.93 **文献标志码**:A

Comparative Experimental Study on Deformation of Transparent Soil Induced by Construction of Quasi-rectangular and Circular Tunnels at Different Buried Depths

YANG Minghui†, XIAO Jianxun, YANG Tao
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The quasi-rectangular tunnel has gradually gained popularized in engineering because of its space advantages. However, there is a lack of in-depth research on the differences between quasi-rectangular and circular tunnels in the surrounding soil layer changes, which are closely related to the buried depth of tunnels. The quasi-rectangular and circular tunnel excavation devices were independently designed and assembled, and transparent soil was used to simulate the surrounding soil layers. Particle image velocimetry (PIV) was used to accurately measure the deformation of the soil layer, and the law of soil deformation induced by the dynamic construction of quasi-

* **收稿日期**:2023-09-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678230), National Natural Science Foundation of China(51678230);河南省交通科技计划项目(2021J7), Transportation Science and Technology Program of Henan Province(2021J7)
作者简介:杨明辉(1978—),男,湖南武冈人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: yamih@126.com

rectangular and circular tunnels at different buried depths was analyzed. Experimental comparison results elucidate that the sliding surfaces of the soil deformation induced by the two types of tunnels are basically the same, which roughly conforms to the vertical sliding surface assumption of Terzaghi's theory. The sliding angle (θ) is approximately equal to $45^\circ+\varphi/2$. The vertical deformation of the overlying soil layer of the circular tunnel always maintains a "V" shaped normal distribution at different buried depths, indicating the presence of a maximum value. The vertical deformation of the overlying soil layer of the quasi-rectangular tunnel changes from a "V" shape to a "W" shape as the depth of the formation increases, indicating the existence of multiple maximum settlements. This suggests that rectangular tunnels result in more uniform ground deformations compared to circular tunnels. Under the same burial depth, the maximum surface settlement induced by the excavation of similar rectangular tunnels is smaller than that of circular tunnels, especially in shallow burial conditions. The difference between both two gradually decreases with the increase of buried depth. These findings can serve as references for the design and selection of construction schemes.

Key words: quasi-rectangular tunnels; soil deformation; transparent soil; PIV technique

随着地下空间资源利用的快速发展,城市新建盾构或顶管隧道逐年增多,但其中多为圆形隧道工程.近年来随着超大断面隧道建设经验的不断积累与成熟,以类矩形为主的异形断面隧道陆续出现在工程应用中.研究表明,类矩形隧道比圆形隧道的有效使用面积增大20%以上,而在拥有同等使用面积的情况下类矩形隧道能节约35%以上的地下空间[1],且非圆形TBM在施工进度、沉降控制、空间利用等方面具有优越性和广阔的应用前景[2].

众所周知,隧道施工会不可避免地引发上覆土体位移,且直接或间接影响地表和地下临近结构,因此上覆土层变形大小是隧道开挖最为关注的问题之一.但研究大都限于单一隧道类型,如张超等[3]提出了非均匀地层圆形隧道施工地表沉降的模拟方法.Ma等[4]分析了不同高宽比的矩形隧道在等面积下的地表沉降规律.魏纲等[5]提出了多因素下类矩形盾构施工引起土体变形计算方法.Zeng等[6]提出适用于任意断面隧道开挖诱发土体变形计算方法并应用在双圆隧道中.亦有不少学者对不同类型隧道进行了对比分析,Sun等[7]提出了水下圆形与矩形盾构隧道最小覆盖层厚度的计算方法.张治国等[8]采用砂土试验分析了相同埋深下类矩形与圆形隧道开挖引发土体沉降差异.Zhao等[9]利用有限元分析了类矩形与等效圆形隧道对地表沉降的影响.张付林等[10]基于Peck公式提出了同工况下类矩形隧道地表沉降介于单圆与双圆隧道之间. 然而研究表明,上覆土层变形受是否形成土拱影响[11-12],而土拱的形成又与埋深紧密相关,可见,分析隧道施工引发的土层变形规律时考虑隧道埋深因素十分必要,而以上对比研究均忽略了该因素的影响.

鉴于此,本文基于透明土技术能够实现非接触式内部土体变形测量,并可避免因布设传感器对土体产生的扰动,利用透明土替代传统土体[13-17],结合PIV技术开展室内模型对比试验,深入研究不同埋深下类矩形与圆形隧道开挖后引起的土体变形的渐进演化规律,从而为隧道开挖的施工方案选择提供参考.

1　模型试验方案

1.1　透明土试样制备

透明土试样由高纯度熔融石英砂和具有相同折射率的孔隙液配制而成,已有研究结果表明熔融石英砂能在一定程度上较好地模拟天然砂土[18-19].本次试验在参照福建标准砂的级配曲线基础上选用了颗粒粒径为0.5~2 mm且纯度高达99.99%的石英砂,通过土工试验测得其基本物理性质,如表1所示.

孔隙液的折射率受温度影响而变化,经反复试配表明当控制室温为22 ℃时,由正十二烷与15号工

表1　透明土的基本物理性质

Tab.1　Basic physical properties of transparent soil

名称	n	比重	ρ_{dmax}/(g·cm^{-3})	ρ_{dmin}/(g·cm^{-3})	φ/(°)	c/kPa
石英砂	1.458 5	2.17	1.535	1.19	39.4	7

业白油以体积比1∶12.5左右混合而成的孔隙液配制的透明土透明度最好,测得折射率为1.458 5,与石英砂折射率基本一致,基本物理性质如表2所示.

表2 孔隙液的基本物理性质

Tab.2 Basic physical properties of pore fluid

名称	n	$\rho/(g\cdot cm^{-3})$	闪点/℃	运动黏度/$(m^2\cdot s^{-1})$
正十二烷	1.421 0	0.753	71	1.4~3.8
15#工业白油	1.461 5	0.849	150	13.5~16.5

配制透明土首先用蒸馏水清洗掉石英砂中的杂质并烘干,随后分层撒布至模型箱中,每完成一层后倒入足量孔隙液,并使用真空排气法将砂子中气泡抽出,而后进行整平密实,当静置过程中观察到土中无明显气泡后再进行下一层透明土配制,直至达到标准高度后,使用砝码压实固结并静置24 h,以便透明土试样达到相对密实且透明程度,如图1所示.

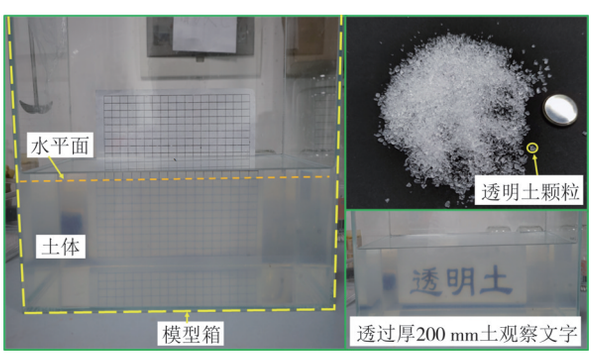


图1 透明土试样

Fig.1 Transparent soil sample

1.2 试验仪器装置

本次试验系统主要由散斑制作系统、开挖模拟系统、图像集析系统三部分组成,如图2所示.其中散斑制作系统由激光发射器组成,其最大功率为2 000 MW,可产生光角为45°且厚度小于1 mm的532 nm片光源,该发光面照射在透明土样上会形成众多散斑,通过观测开挖中散斑的位置变化得出相应位置土体变形.开挖模拟系统包括电动推拉杆、模型箱及亚克力管,推拉杆的伸缩距离为200 mm,最大拉力为600 N,速率范围为0.1~5 mm/s,试验中推拉速率恒定为1 mm/s,保证试验中隧道能精准匀速分步开挖.图像集析系统包括CMOS数码相机与PC机,数码相机负责图像采集,经由PC机后进行数据处理.

试验中模型箱由超白玻璃制作,为最大限度地减轻边界效应并满足刚度及透明度要求,选定尺寸为310 mm×180 mm×260 mm×5 mm(长度×宽度×高度×

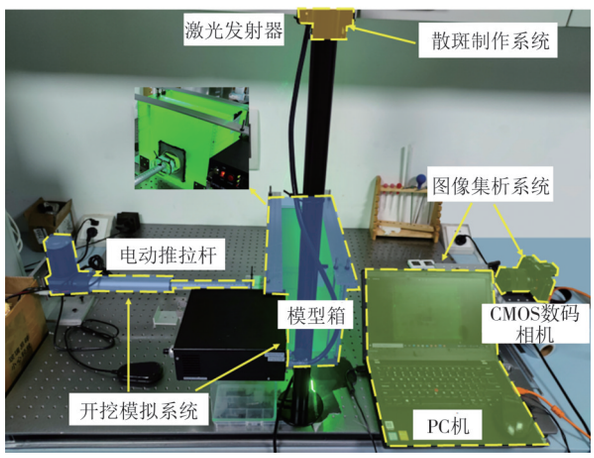


图2 模型试验装置

Fig.2 Devices for model experiments

厚度),对于类矩形与圆形隧道均采用"套管法"模拟开挖,即通过推拉杆将外管匀速拔出以模拟隧道施工引起的地层损失.类矩形模型管尺寸取自国内11.83 m×7.27 m类矩形顶管/盾构一体机,几何相似比为1/160.其他物理量相似,根据维度分析法推得为:

$$\begin{cases} C_{E_g} = C_c = C_Z = C_D = C_H = C_B = 1/160 \\ C_\gamma = C_\varphi = 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中:E_g为弹性模量;c为黏聚力;Z为隧道埋深;D为圆形隧道直径;H为类矩形隧道高度;B为类矩形隧道宽度;γ为土体重度;φ为内摩擦角.

根据几何相似比确定类矩形外管尺寸为70 mm×45 mm×230 mm(宽度×高度×长度),内管尺寸为64 mm×39 mm×205 mm(宽度×高度×长度),使用CNC机床精密加工以保证内外管紧密贴合.为使二者截面积相等并且为常规尺寸,圆形外管直径为60 mm,内管直径为54 mm,如图3所示.最终类矩形与圆形截面积分别为29.5 cm^2、28.3 cm^2(差异在5%以内).由于本文为缩尺试验,在已有案例[12,16]基础上适当增大地层损失率可有效减小仪器与测量误差,因此将两类模型外管壁厚均设为3 mm,类矩形与圆形地层损失率分别为19.7%、18.9%(差异在5%以内).试验中类矩形与圆形隧道中心埋深一致,其中心距模型箱底部均为78 mm,类矩形隧道两端到侧边界距离为115 mm,约为隧道模型半宽的3倍,与Zhao等[9]的矩形隧道边界条件一致.为了防止试验中发生漏液现象,自主设计制作了10 mm厚的类矩形与圆形密封圈并粘贴在模型箱一侧,如图4所示,模型箱三维图如图5所示.

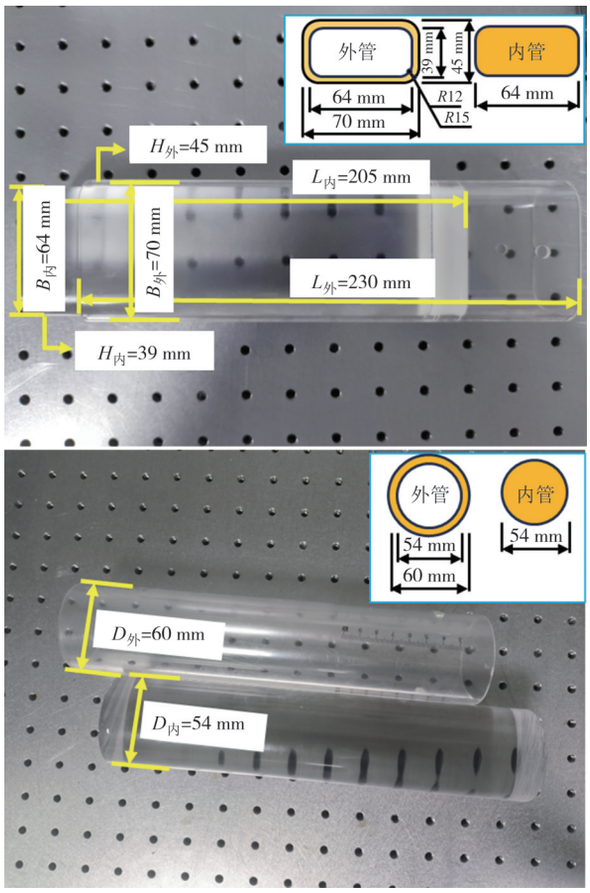


图 3　类矩形与圆形亚克力管实物图

Fig.3　Quasi-rectangular and circular acrylic pipes

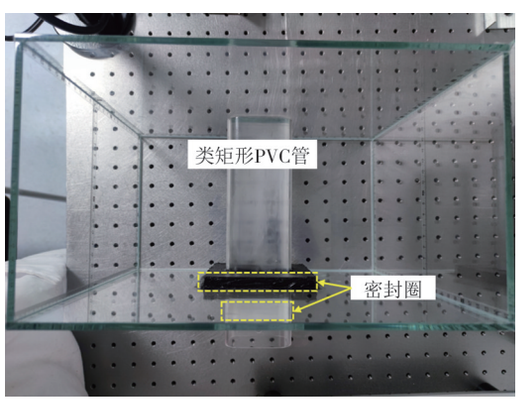


图 4　密封圈示意图

Fig.4　Schematic diagram of sealing ring

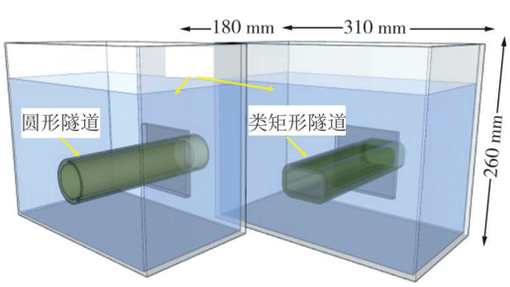


图 5　模型箱三维图

Fig.5　3D representation of the model boxes

1.3　试验工况及步骤

本文主要考虑埋深条件对类矩形与圆形隧道的影响.针对类矩形隧道,本文以隧道外管高度 H 为划分依据进行了 5 次相对隧道埋深试验(Z/H,隧道顶部埋深与隧道高度之比),针对圆形隧道,由于已有深入的研究,而本文设计圆形隧道主要对比两类隧道诱发土体变形差异性,因此只依照类矩形隧道 H、$2H$、$3H$ 埋深进行三组圆形工况,如表 3 所示.

表 3　隧道模型试验工况

Tab.3　Experimental conditions for tunnel model test

工况	工况说明	隧道顶部埋深/mm	隧道中心埋深/mm	Z/H
1	类矩形 1	45	68	1.0
2	类矩形 2	68	90	1.5
3	类矩形 3	90	112	2.0
4	类矩形 4	112	135	2.5
5	类矩形 5	135	158	3.0
6	圆形 1	38	68	1.0
7	圆形 2	82	112	2.0
8	圆形 3	128	158	3.0

进行试验前,必须保证室内环境黑暗,并将所有装置都固定在光学平台上.待装置固定后打开激光器进行预热,在此期间调整相机光圈与焦距使得视场宽度合适,随后调节激光散斑面至模型箱宽度 1/3 处,如图 6 所示.为减小前后边界影响,待激光输出功率稳定后首先缓慢预拉外管 10 mm,并采集初始透明土散斑场图像,之后每拉外管一次(10 mm)并相应静置 5 min,使土体沉降稳定后采集当前透明土散斑场图像,共模拟开挖 150 mm 采集 15 步.试验结束后采用 PIV 技术对所有图像进行处理,将图像导入 PIVview2C 进行分析以获得土体自由场位移信息,并使用 Tecplot 进行辅助分析,获取土体竖向位移矢量图和等值线图.类矩形与圆形隧道模型试验激光散斑图如图 7 所示.

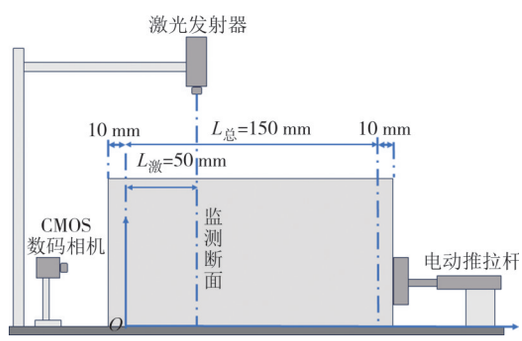


图 6　位移监测断面示意图

Fig.6　Schematic diagram of displacement monitoring section

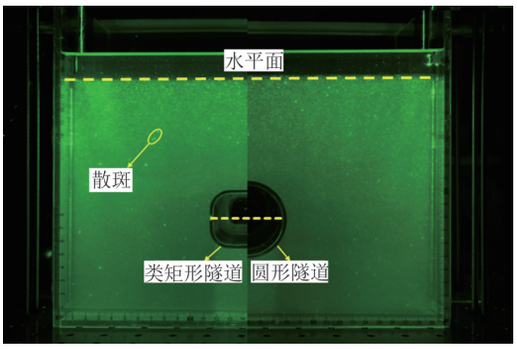


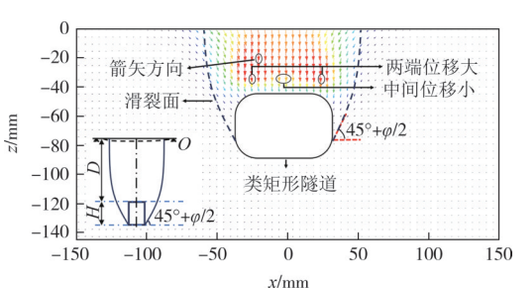
图 7 激光散斑图

Fig.7 Laser speckle pattern

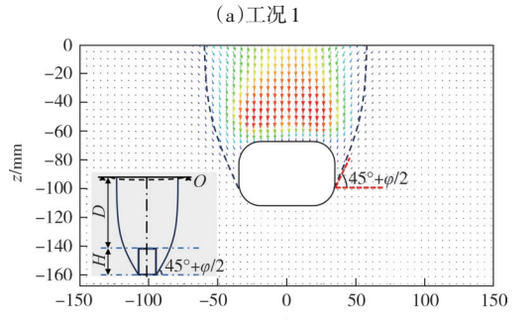
2 试验结果分析

2.1 土体自由位移场分析

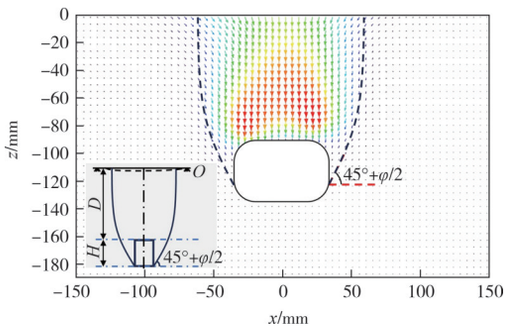
隧道开挖将引发周边土体发生显著变形,而土体自由场是土体变形最直观的体现.图 8 为掘进距离 L=150 mm 时监测面处类矩形与圆形隧道在不同埋深下的土体自由位移场,不同埋深下隧道两侧土体变形均呈对称分布.当隧道埋深为 H 时,地层土体在两类隧道开挖后表现为整体沉降(如图 8 中红色箭头所示),不具备自稳能力,但随着埋深增大,距隧道上方越远处土体变形越小,地层土体转变为局部沉降,具备了自稳能力.由图 8 中箭头方向可知,土体产生滑动后,松动土体与两侧未滑移土体会形成滑裂面,其形状与太沙基理论的竖直滑动面类似[20].圆形隧道滑裂面起点一般位于隧道起拱处,而类矩形隧道则是从底部倒角处向上延伸至地表从而发生坍塌,本文依据 PIVview2C 分析所得的箭头数量及方



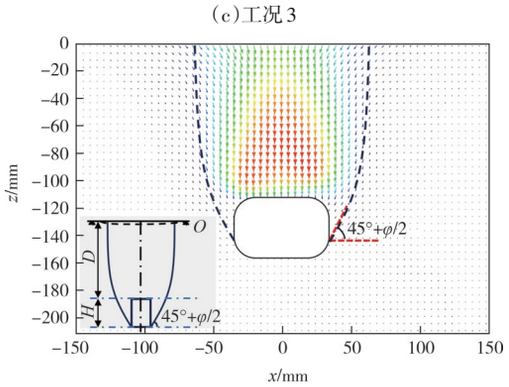
(a)工况 1



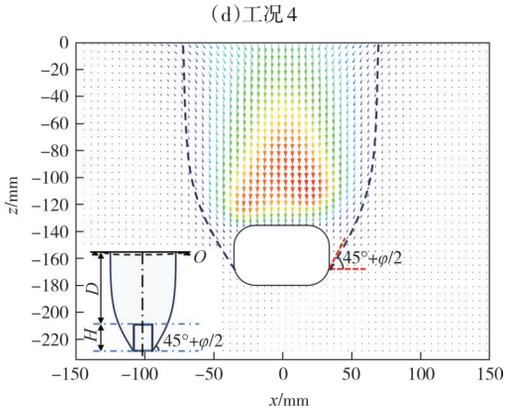
(b)工况 2



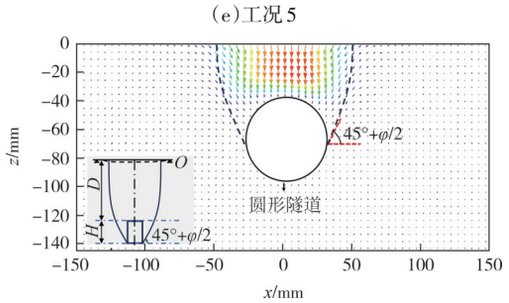
(c)工况 3



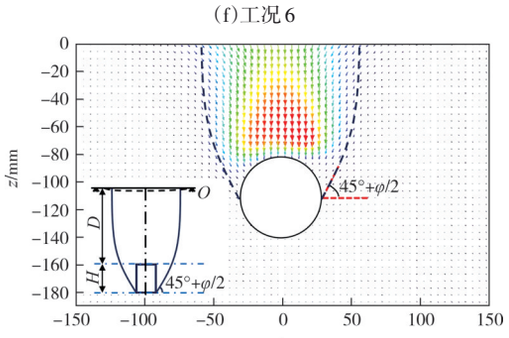
(d)工况 4



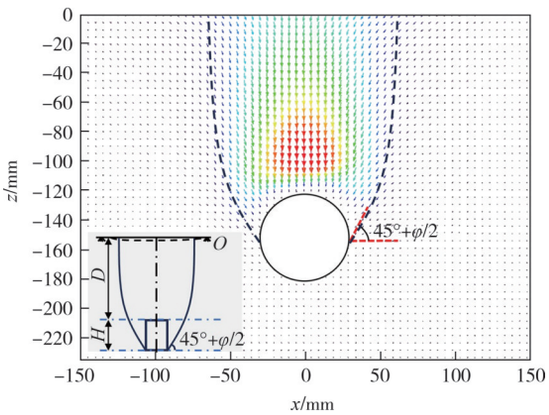
(e)工况 5



(f)工况 6



(g)工况 7



(h)工况 8

图 8　不同埋深下土体自由位移场

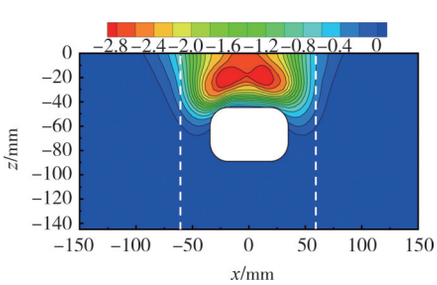
Fig.8　Free displacement field of soil at different buried depths

向绘制了滑裂面.滑裂面与水平面的夹角θ为滑裂角,可以看出,在类矩形与圆形隧道中的滑裂角均与太沙基理论的滑裂角($\theta=45^\circ+\varphi/2$)大致吻合.

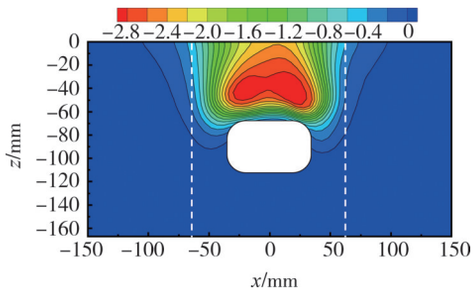
2.2　土体竖向位移分析

隧道开挖引起的上覆土体下沉量是工程中最为关注的参量.图 9 为掘进距离 L=150 mm 时监测面处在不同埋深下的土体竖向位移云图.从扰动情况看,随着埋深增大,类矩形隧道中心扰动区由“哑铃形”逐步转为“倒心形”,而圆形隧道中心土体扰动区形似“椭圆形”.从分布情况看,开挖结束后两类隧道上覆土体位移自上而下均呈现由小到大再减小的分布规律.当地层深度一定时,随着与隧道中心距离增大,隧道左右两侧土体位移逐渐减小.可将某一区间内地层沉降占总沉降 85% 的位置视为位移集中范围[21],如图 9 中白线所示.考虑不同埋深影响下,类矩形隧道主要位移分布在轴线左右各 85%B~115%B 范围内(B 为隧道宽度),圆形隧道主要位移分布在轴线左右各 90%D~120%D 范围内(D 为隧道直径).

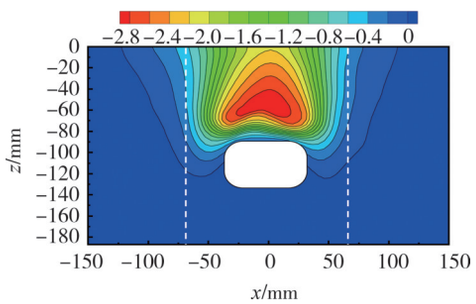
对不同地层处土体进行沉降分析亦能有效揭示两类隧道沉降差异,为此对不同埋深下每 10 mm 地层位置处取值分析,如图 10 所示.以埋深 2H 下两类



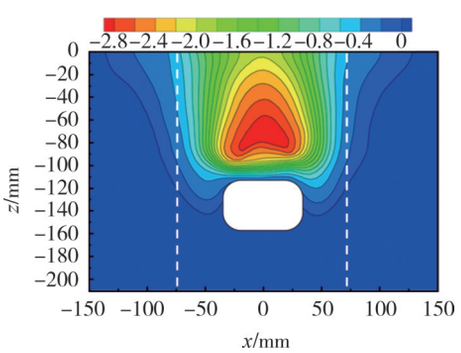
(a)工况 1



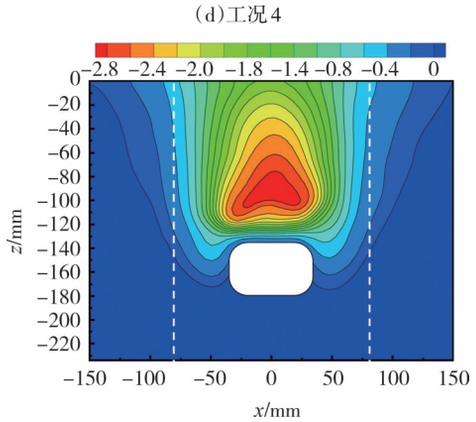
(b)工况 2



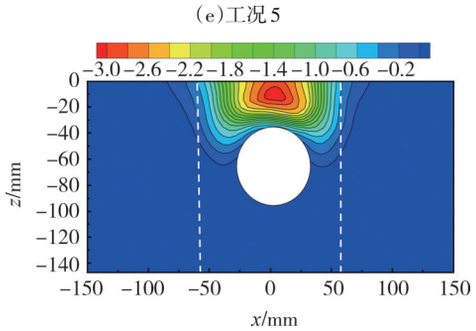
(c)工况 3



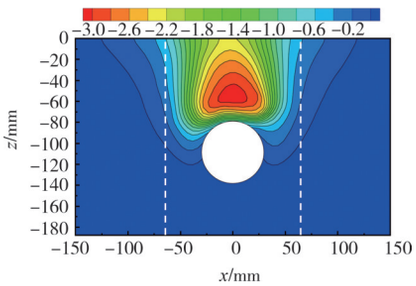
(d)工况 4



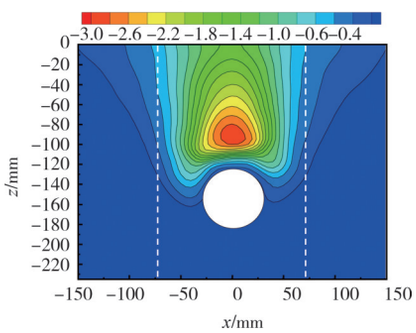
(e)工况 5



(f)工况 6



(g)工况 7



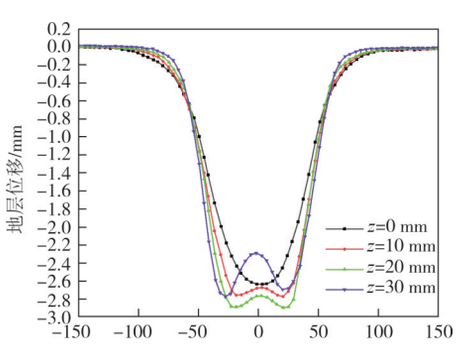
(h)工况 8

图 9 不同埋深下隧道施工诱发土体竖向位移云图

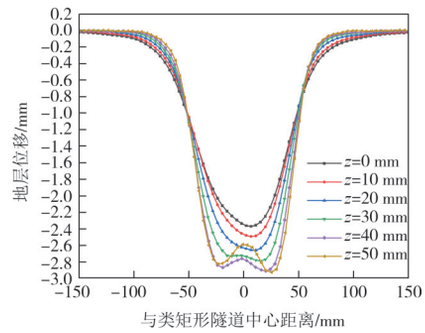
Fig.9 Vertical displacement nephogram of soil induced by tunnel construction at different buried depths

隧道为例,随着地层深度增加,土体沉降槽宽度逐步减小,当地层深度为 60 mm 时,圆形隧道最大沉降值为 3.04 mm,位于隧道中心上方,土体沉降曲线保持“V”型,类矩形隧道最大沉降值为 2.91 mm,位于隧道轴线两侧,土体沉降曲线由从“V”型逐渐变为“W”型,隧道两侧土体沉降量大于隧道正上方.这是由于类矩形隧道的宽度较大,隧道开挖后顶部正上方土体会垂直下落,而两侧土体会各自向隧道转角处滑移,此时隧道两侧因土体损失产生的沉降在隧道上方的重叠区域变小,而在近隧道顶部呈现“W”型位移曲线,与此不同的是圆形隧道正上方土体会向两侧滑移,呈现“V”型位移曲线,如图 11 所示.

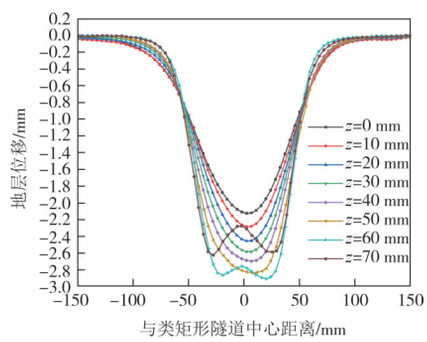
随着埋深增大,两类隧道地层内最大沉降值均逐渐增大,对比类矩形隧道引发地层最大沉降值与



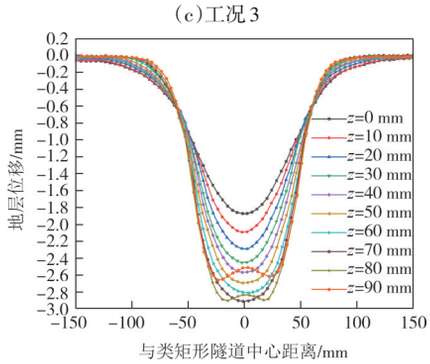
(a)工况 1



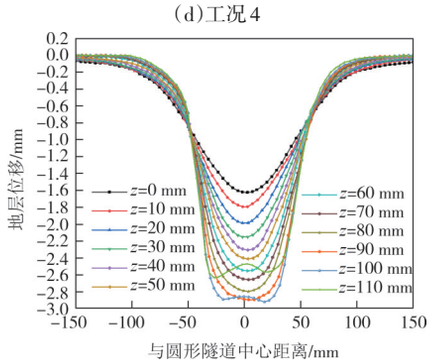
(b)工况 2



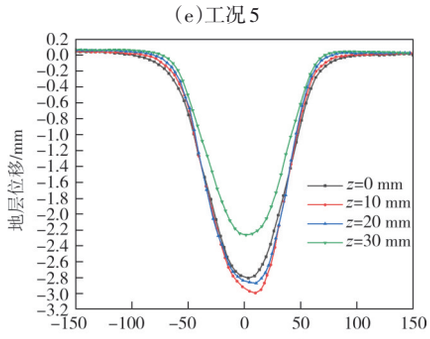
(c)工况 3



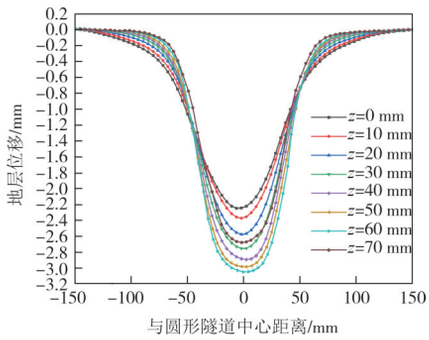
(d)工况 4



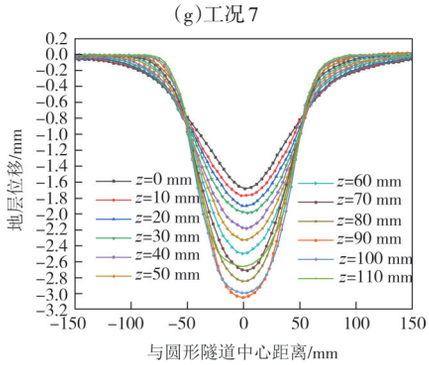
(e)工况 5



(f)工况 6



(g)工况 7



(h)工况 8

图 10　不同埋深下地层竖向位移值

Fig.10　Vertical displacement values of strata at different buried depths

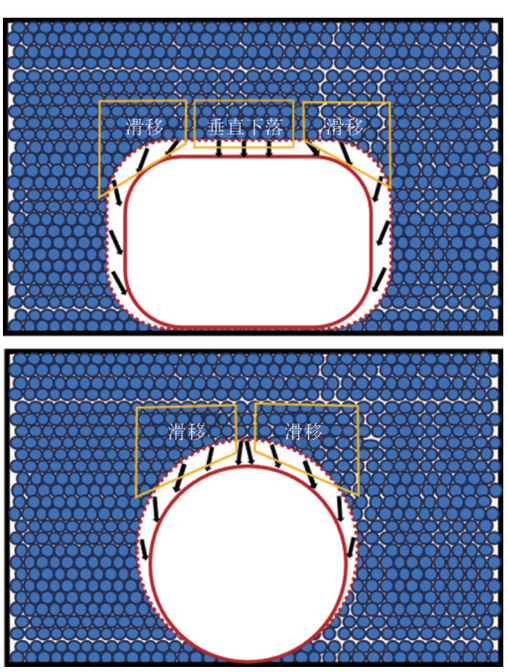


图 11　隧道顶部土体位移变化趋势

Fig.11　Change trend of soil displacement at the top of tunnel

其同深度处中心沉降值可知,埋深增大会导致中心沉降与两侧最大沉降差值减小,反映隧道顶部的“W”型土体沉降曲线随埋深增大而逐渐趋于平缓,如图 12 所示.

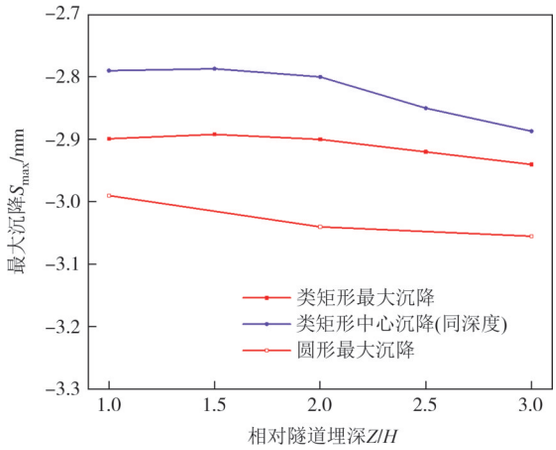


图 12　不同埋深下隧道施工诱发土体最大沉降值

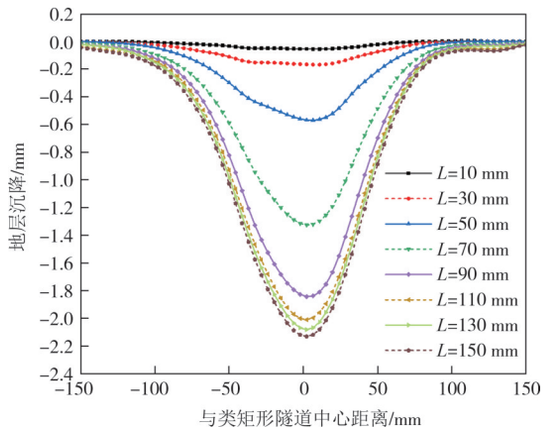
Fig.12　Maximum settlement of soil induced by tunnel construction at different buried depths

2.3　分步开挖位移时程分析

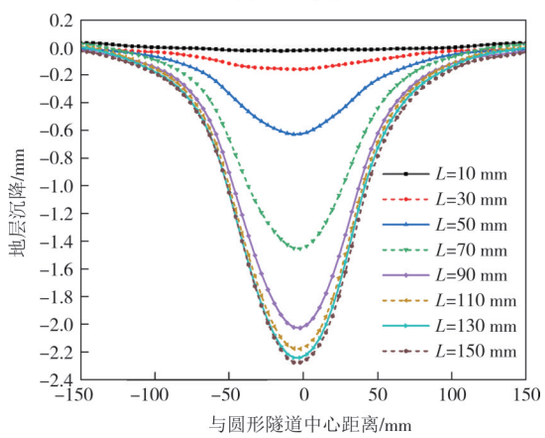
隧道施工对上覆土体扰动实际为动态变化过程,因此研究隧道动态开挖过程有助于更好地预测不同状态下土体变形.图 13 为埋深 2H 下类矩形与圆形隧道动态开挖对监测断面处地表沉降变化图.当 L=30 mm,即隧道从初始阶段开挖至 30 mm 时,两类隧道地表累积位移占总位移的 8%,在未到达监测面时土体位移较小;当 L=50 mm 时,地表累积位移占比为 28%,土体扰动程度逐渐增大;当 L=70 mm 时,地表累积位移占比为 62%,土体沉降速度达到最大;当 L=110 mm 时,两类隧道地表累积位移占比为 95%,基本达到最终位移.由此可见土体沉降主要发生在隧道穿越及背离监测面之后,且主要影响阶段为通过监测面后 85%B(类矩形隧道宽度)或 1 倍圆形隧道直径 D 范围内.由图 14 可知,土体位移时程变化特征不受隧道断面形状的影响,但当隧道埋深增大时,隧道掘进过程中对监测面地表处的最大沉降与最终沉降的比值变化幅度会渐趋于平缓,说明在深埋隧道下监测面处受扰动土体位移时程变化幅值更均匀.

2.4　地表沉降分析

图 15 和图 16 为掘进距离 L=150 mm 下监测面处不同埋深下两类隧道地表沉降槽等参数对比.隧道开挖引起地表沉降最大值位于隧道轴线上方,随着埋深增大,最大沉降值逐渐减小而沉降槽宽度逐渐增大,这是由于埋深增大后对土体扰动的影响不容易传递至地表处,在地层内部产生了“土拱效应”从而抑制了地表沉降.相同埋深下类矩形隧道开挖引起的地表沉降最大值小于圆形隧道,沉降槽也宽于圆形隧道.埋深 1H、2H、3H 下两类隧道最大沉降差



(a)类矩形隧道



(b)圆形隧道

图 13 隧道动态开挖下地表沉降

Fig.13 Surface subsidence under dynamic excavation of tunnel

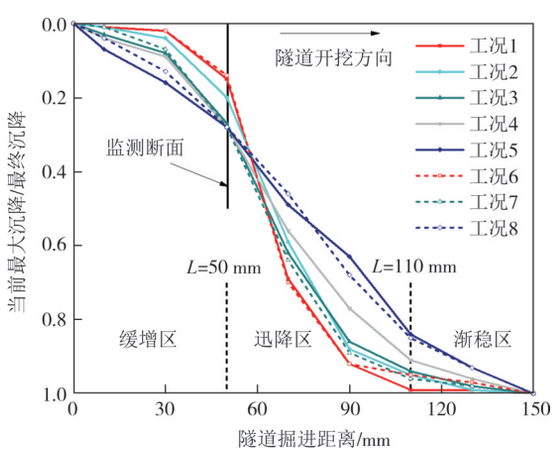


图 14 不同埋深下隧道动态开挖地表沉降比值变化幅值

Fig.14 Variation amplitude of surface settlement ratio during dynamic excavation of tunnels at different buried depths

值分别为6%、5%、3%,表现出两类隧道地表沉降曲线随埋深增大而逐渐接近,这是由于埋深较浅时如Z=1H,在相同土体损失下类矩形隧道较圆形隧道有更广的土体扰动范围,因而土体整体沉降更为均匀,当埋深增大后土体扰动传递范围均变大,隧道截面形状对土体沉降差异性影响减弱.以上表明在浅埋施工中类矩形与圆形隧道引起的地表沉降差异更为显著.

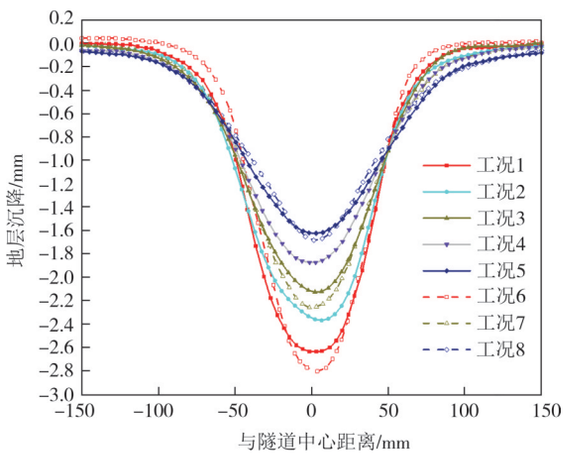


图 15 不同埋深下地表沉降

Fig.15 Surface subsidence at different buried depths

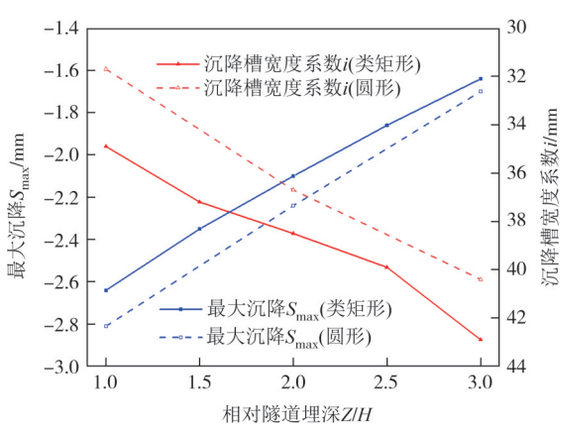


图 16 隧道沉降槽参数与相对隧道埋深的关系

Fig.16 Relationship between tunnel settlement trough parameters and relative tunnel buried depth

3 结 论

本文基于PIV技术并结合透明土开展了不同埋深下类矩形与圆形隧道施工诱发上部土体变形的对比模型试验,获取了两类断面隧道在不同埋深下的土体变形规律,主要结论如下:

1)隧道埋深对土体变形有重要影响,随着隧道埋深增大,两类隧道地表沉降逐渐减小,不同埋深下两类隧道诱发土体变形的滑裂面基本一致,符合太沙基理论的竖直滑动面假定.

2)相同埋深下,随着地层深度增加,圆形隧道诱发土体沉降曲线始终保持“V”型,类矩形隧道诱发土体沉降曲线由“V”型转变为“W”型,最大土体位移处

于隧道左右两侧.类矩形隧道主要位移分布在轴线左右各85%B~115%B范围内,圆形隧道主要位移分布在轴线左右各90%D~120%D范围内.

3)隧道开挖过程会影响土体稳定,两类隧道诱发土体沉降主要发生在通过监测断面并远离阶段,监测面处随着埋深增大,受扰动土体位移时程变化幅值更为均匀.

4)相同工况下,类矩形隧道引发的土体沉降小于圆形隧道,沉降槽宽于圆形隧道,随着埋深增大,两者差异性逐渐缩小.表明当工程中对位移控制要求严格时,在浅埋状态下可优先考虑采用类矩形隧道施工.

参考文献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40. (in Chinese)

[2] LI J B. Key technologies and applications of the design and manufacturing of non-circular TBMs [J]. Engineering, 2017, 3(6): 905-914.

[3] 张超,徐智文,刘飞香,等. 考虑地层三维空间分布的盾构掘进模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):144-151.
ZHANG C, XU Z W, LIU F X, et al. Numerical simulation of shield tunneling incorporating 3D spatial distribution of strata[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 144-151. (in Chinese)

[4] MA P, SHIMADA H, SASAOKA T, et al. Investigation on the engineering effects of the geometrical configuration of the jacking rectangular pipe [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2022, 119:104239.

[5] 魏纲,张鑫海,徐银锋. 考虑多因素的类矩形盾构施工引起土体竖向位移研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):199-208.
WEI G, ZHANG X H, XU Y F. Deriving vertical displacement of ground due to quasi-rectangular shield tunneling considering multiple factors [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 199-208. (in Chinese)

[6] ZENG B, MA R, HUANG D, et al. A unified method of predicting soil deformations induced by various shaped-section tunnelling in clays[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10:1031332.

[7] SUN W X, HAN F C, LIU H L, et al. Determination of minimum overburden depth for underwater shield tunnel in sands: comparison between circular and rectangular tunnels[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(7): 1671-1686.

[8] 张治国,方蕾,马少坤,等. 类矩形软土隧道开挖引起地层沉降物理模型试验研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(增刊1):762-771.
ZHANG Z G, FANG L, MA S K, et al. Experimental study on physical model of ground settlement caused by excavation of quasi-rectangular soft soil tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(Sup.1): 762-771. (in Chinese)

[9] ZHAO T C, DING W Q, QIAO Y F, et al. A large-scale synchronous grouting test for a quasi-rectangular shield tunnel: observation, analysis and interpretation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 103018.

[10] 张付林,寇晓勇,黄俊. Peck及其修正公式在类矩形隧道施工地表沉降预测中的应用[J]. 现代隧道技术,2016,53(增刊1):189-194.
ZHANG F L, KOU X Y, HUANG J. Application of Peck formula and its modified versions in ground settlement prediction during quasi-rectangular tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(Sup.1): 189-194. (in Chinese)

[11] 叶友林, 路志旺. 砂砾地层浅埋盾构隧道开挖对地表变形的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 1064-1072.
YE Y L, LU Z W. Impact of shallow-buried shield tunneling in sand-gravel strata on surface deformation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(6): 1064-1072. (in Chinese)

[12] 张家文,邢文豪,蒋仕清,等. 浅埋隧道施工对上覆地层变形影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(4):1233-1240.
ZHANG J W, XING W H, JIANG S Q, et al. Experimental study on the effect of shallow tunnel construction on deformation of overlying strata [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(4): 1233-1240. (in Chinese)

[13] MA S K, DUAN Z B, HUANG Z, et al. Study on the stability of shield tunnel face in clay and clay-gravel stratum through large-scale physical model tests with transparent soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104199.

[14] AHMED M, ISKANDER M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(5): 525-535.

[15] ADS A, SHARIFUL ISLAM M, ISKANDER M. Longitudinal settlements during tunneling in soft clay, using transparent soil models [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 136: 105042.

[16] ZENG B, ZHU Y C, YE S Q, et al. Double-O-tube shield tunneling-induced soil displacement considering burial depth and convergence mode: transparent soil experiment and DEM simulation[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 925356.

[17] 徐志军,王云泰,杜建平,等. 缩径基桩竖向承载性能的透明土试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):214-221.
XU Z J, WANG Y T, DU J P, et al. Experimental study on vertical bearing capacity of necking pile assisted with transparent soil test [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 214-221. (in Chinese)

[18] LIU J Y, ISKANDER M G. Modelling capacity of transparent soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4): 451-460.

[19] ISKANDER M G, SADEK S, LIU J Y. Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2002, 2(4): 13-26.

[20] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1943.

[21] NIU Z L, CHENG Y, ZHANG Y W, et al. A new method for predicting ground settlement induced by pipe jacking construction [J].Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1681347.