

DOI: 10.11779/CJGE201808017

小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究

金大龙^{1, 2}, 袁大军^{1, 2}, 韦家昕³, 李兴高^{1, 2}, 陆平^{1, 2}

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 以深圳地铁7号线、9号线四条小净距隧道近距离下穿既有地铁1号线工程为研究背景, 通过离心模型试验方法, 分析了小净距隧道群施工对周围土体应力影响规律, 揭示了盾构多次近距离穿越施工引起既有线变形及受力变化机理。研究表明: ①小净距四线隧道开挖具有明显的“群洞效应”, 隧道群的形成会导致松动区扩大、土拱向上扩展, 从而引起新建隧道承受竖向土压力增加; ②既有隧道沉降随穿越次数的增多而增大, 最终沉降为4次穿越叠加的结果, 峰值位置基本位于4条隧道中心线正上方, 盾构隧道每次穿越引起沉降增幅为13%~48%, 穿越区域横向影响范围可达60 m以上; ③新建隧道的开挖对既有隧道环向弯矩的影响不大, 弯矩变化不超过10%, 而对既有隧道纵向弯矩影响较大, 随着穿越次数增加纵向弯矩明显增大, 这也是隧道下穿施工引起纵向裂缝和渗漏水的主要原因。结合数值模拟计算进行对比分析, 得到规律与试验相一致, 进一步验证了试验结果对实际工程的可靠性。

关键词: 地铁盾构; 小净距隧道群; 多次下穿; 既有线变形

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)08-1507-08

作者简介: 金大龙(1988-), 男, 主要从事盾构隧道施工方面研究。E-mail: jindalong@163.com。

Centrifugal model test of group tunneling with small spacing beneath existing tunnels

JIN Da-long^{1, 2}, YUAN Da-jun^{1, 2}, WEI Jia-xin³, LI Xing-gao^{1, 2}, LU Ping^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of the Education Ministry, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The existing metro line 1 in Shenzhen is under-crossed by four shield tunnels of metro line 7 and line 9 in close proximity. Based on the physical modeling of centrifuge tests, the influences on the stress of surrounding soil from construction of multiple tunneling in close proximity are analyzed. The deformation mechanism and stress characteristics of the existing tunnels induced by multiple under-crossing construction are investigated. The study shows that: (1) The group tunneling with small spacing can cause the ‘group-hole effect’ in the non-crossing region. The expanding of disturbed zones is the main reason for the soil pressure increasing above the new tunnels. (2) The settlement of the existing tunnels increases with each excavation process and reaches the final settlement as a result of four under-crossing superposition. The maximum settlement is above the center-line of four tunnels with the settlement trough width of more than 60 m. (3) The four shield tunnels in close proximity cause a significant increase in the longitudinal bending moment of the existing tunnels, while the circumferential moment changes a little. Therefore, segment fracture may appear after under-crossing construction. The test results are compared with the simulated ones, and they exhibit a similar change rule.

Key words: shield tunnel; group tunneling with small spacing; multiple under-crossing; existing tunnel

0 引言

近年来, 随着中国地铁线网的形成, 受地上地中建(构)筑物的限制, 新建隧道近接穿越既有建(构)筑物施工成为线路规划不可避免的问题。在城市地铁隧道建设中, 盾构下穿既有隧道施工也越来越常见^[1-5], 双线甚至多线下穿既有运营隧道等极端复杂工程也开

始出现, 盾构施工不可避免地会对既有隧道受力和变形产生影响, 尤其是盾构多次下穿施工, 周围土体扰动更剧烈, 隧道变形更加难控, 盾构机、土体、隧道

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2015CB057800);
中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016YJS109)

收稿日期: 2017-05-25

结构三者间的相互作用极为复杂,稍有不慎就会导致地铁停运,甚至是酿成事故,因此有必要对盾构多次下穿既有运营隧道展开系统研究。

目前,已经有不少学者对隧道下穿施工展开了研究,并取得了较好的研究成果。汪洋等^[6]利用模型试验和数值分析的方法,考虑隧道刚度折减,得到围岩、支护压力、净距对上覆隧道的位移和附加应力的分布规律;Marshall 等^[7]通过离心模型试验讨论了隧道开挖引起的土层应变与管线的弯曲行为,给出了土层损失、土层应变和管线弯曲变形间的关系,修正了估算弹性连续体地基土层刚度的方法,并把管线弯矩与其它方法得到的结果进行了对比;黄德中等^[8]利用离心模型试验对上海外滩通道上穿地铁 2 号线工程进行了研究,采用排液法和补液法在不停机状态下模拟地层损失和盾构注浆,并结合实测数据对盾构上穿越施工引起的地层、新建隧道与既有隧道的纵向位移变化规律进行了分析。邵华等^[9]利用三维数值模拟方法提出下穿盾构推进与上方近接隧道结构位移的关系;代翼飞等^[10]结合武汉 3 号线下穿 2 号线的工程实例,运用数值分析的方法,得到了既有隧道竖向位移与盾构机顶推力、土层加固、盾构机掘进位置的关系;白海卫等^[11]基于弹性地基梁模型,推导了计算既有隧道受新建隧道垂直下穿施工影响而产生的纵向沉降曲线表达式、纵向应力计算公式。在复杂下穿工程方面,Yamaguchi 等^[12]对日本东京地铁四孔交错重叠隧道进行了研究,Solimane 等^[13]针对德国双线隧道进行了有限元建模分析,着重探讨了双线下穿对既有线的叠加效应;凌昊等^[14]通过室内离心模型试验模拟双孔盾构隧道近接施工,固定损失 0.5%,研究了两条隧道 4 种不同相对位置下衬砌结构横向内力的量值、分布规律以及随盾构推进距离和两隧道相对位置的变化规律。

通过调研可知,已有研究主要针对单线下穿既有隧道施工,关于多线下穿等复杂穿越工程的研究较少,相应的试验研究也较为缺乏。本文依托深圳地铁车公庙 7 号线、9 号线地铁下穿既有地铁 1 号线工程,采用离心模型试验的方法,研究了小净距隧道群下穿施工时既有隧道及周围地层变形及受力规律,研究成果可为类似工程提供指导。

1 工程概况

深圳地铁 7 号线、9 号线下穿既有地铁 1 号线区间隧道工程位于深圳市福田区车公庙附近,该交叉隧道区间位于繁华市政主干道下方,地面建筑密集、交通量大,且下穿期间要保证地铁 1 号线的正常运营。

其中,7 号线、9 号线为新建隧道,采用盾构法施工,隧道埋深约为 20 m,既有地铁 1 号线为矿山法隧道。地铁 9 号线先行穿越(先右线后左线),地铁 7 号线后继穿越(先左线后右线),新建隧道与既有隧道最小间距 2.78 m,相邻新建隧道间最小净距 3.2 m,盾构穿越的地层主要为砾质黏土,具体工程概况如图 1 所示。

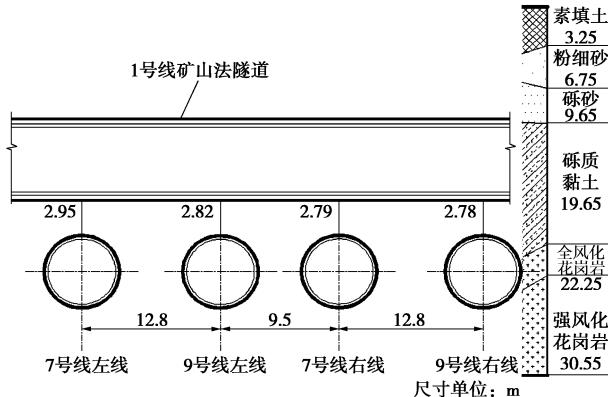


图 1 穿越工程剖面图

Fig. 1 Cross-section of crossing engineering

2 离心模型试验设计

2.1 试验设备及装置

试验采用交通运输部天津水运工程研究院 TK-C500 型土工离心机(图 2),离心机有效容量为 500g·t,有效半径为 4.5 m,可实现最大加速度为 250g,吊斗设计空间为 1.4 m×1.5 m×1.5 m。模型箱采用隔栅型高刚度合金侧壁,可以提高模型箱的整体刚度,减少离心机高速旋转中模型箱的变形,进而降低由于模型箱的变形引起的土体力学性质的改变。

试验设计离心加速度 80g,模型和原型参数之比为 1:80,根据离心试验基本原理和量纲分析方法选定相关参数如表 1 所示。如图 3 所示为试验装置实物图,试验装置主要由试验箱主体、开挖模拟系统和油缸驱动系统三部分组成,整体尺寸(长×宽×高)为 1.2 m×1.8 m×1.2 m,模型土箱采用高强铝合金材料加工,土箱尺寸(长×宽×高)为 1.2 m×0.6 m×1.0 m。以往离心模型试验中隧道开挖的实现通常采用排液法^[7-8],该方法将新建隧道周围固定体积的水排出模拟地层损失率,可以一定程度上再现隧道开挖对周围地层及结构的影响,但同时也具有开挖速度难控、排液精度低等问题。为解决这些问题,本次试验中隧道开挖通过推出模型隧道外侧薄套管模拟地层损失,隧道开挖模拟系统包括新建隧道、不锈钢外套管、隔板和支撑部件,有效开挖距离为 60 cm;油缸驱动系统由 4 个高精度液压油缸、调速油阀和固定支架组成,油缸最大行程 60 cm,最大推力 21000 N。试验设定地层损

失率为1%, 套筒厚度为0.2 mm。隧道结构采用与原型钢筋混凝土密度、泊松比相近, 结构更紧密, 性质更均匀的铝合金材料模拟, 具体参数如表2所示。



图2 TK-C500型土工离心机

Fig. 2 TK-500 geotechnical centrifuge



图3 离心试验装置图

Fig. 3 Picture of centrifugal test devices

表1 模型参量比例常数(模型/原型)

Table 1 Ratios of similitude parameters

参量	比例常数	参量	比例常数
线性尺度	1:80	应变	1
加速度	80	位移	1:80
重度	80	密度	1
应力	1	固结时间	1:6400
弹性模量	1	弯矩	1:512000

表2 模型隧道参数

Table 2 Parameters of model tunnel

类别	外径/cm	厚度/mm	弹性模量/GPa	隧道埋深/cm
原型	660×685	640	28	960
模型	8.8	3.1	72	12

2.2 土体参数

试验土体为深圳车公庙下穿工程原状土, 为操作简便可行, 同时减少不确定性因素, 试验采用背景工程中的主要穿越地层土体—砾质黏性土进行制模, 土体高度为60 cm, 隧道覆土厚度为25 cm, 这也是深圳地区盾构施工遇到的典型地层。其物理力学参数见表3。

2.3 监测方案

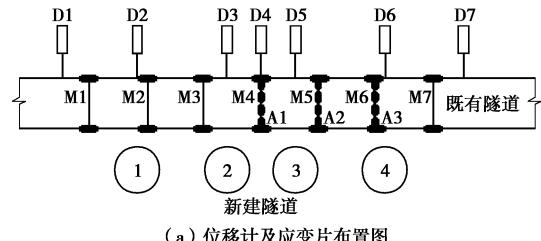
本次试验对既有隧道受力、变形以及周围土压力

进行监测。其中, 环向弯矩布置3个监测断面(A1~A3), 每个断面设置4个测点, 弯矩的获取通过在隧道内外表面黏贴应变片和两个定值电阻组成的全桥电路实现。纵向弯矩布置7个监测断面(M1~M7), 每个监测断面需要在拱顶和拱底位置黏贴应变片, 并进行专门的弯矩标定。隧道竖向变形通过LVDT位移传感器进行监测, 共布置7个测点(编号为D1~D7), 测点位置位于隧道拱顶。采用微型应变式土压力传感器对下穿区域和非下穿区域土压力进行监测, 包括8个竖向土压力测点(S1~S8)及2个侧向土压力测点(C1~C2), 测点布置如图4所示。

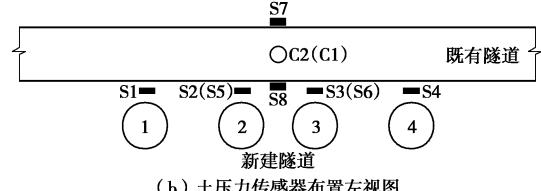
表3 试验土体参数

Table 3 Parameters of soils

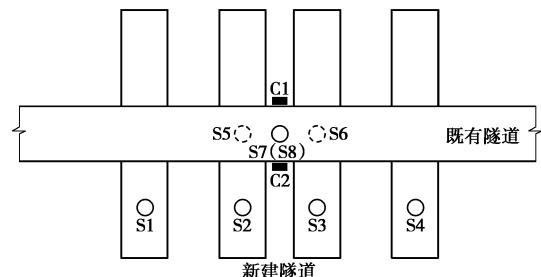
土层	含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/c/kPa	内摩擦角/°	剪切模量/MPa	泊松比
砾质黏性土	14.1	17.8	15	33	8.7	0.33



(a) 位移计及应变片布置图



(b) 土压力传感器布置左视图



(c) 土压力传感器布置俯视图

图4 测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points

2.4 试验流程

4条隧道的开挖顺序与实际工程相对应, 开挖顺序为④—②—①—③(图4)。试验过程包括: ①逐渐增加离心机加速度至80g, 持续运转12 h保证土体的固结稳定。②按顺序进行隧道开挖, 全部开挖完成后, 关闭驱动系统, 继续运行1 h。③逐渐降低离心机转速至停机, 吊出试验装置, 试验结束。

3 试验结果分析

3.1 土体应力变化规律

(1) 非下穿区域土压力变化

如图5所示为非下穿区域土压力变化历时曲线,综合分析图5(a)~(d)可知:小净距4条隧道隧道下穿会引起S1~S4测点土压力突变(土压上升或者降低),各测点土压力增减变化与其位置关系密切相关,以S2测点为例,第1条隧道(编号④)开挖该测点土压力基本无变化,第2条隧道(编号②)开挖该测点土压力呈现降低趋势,第3条和第4条隧道开挖则引起测点土压力连续升高。结合隧道开挖位置和顺序进行分析可知,小净距四线平行隧道开挖对周围土体应力重分布影响较大,隧道开挖卸荷作用会引起周围土体压力降低,影响范围约为左右两侧1倍洞径,后建隧道开挖导致临近新建隧道上覆土压力明显增大,土压力最大增加50 kPa左右。如图6所示,这是由于多条隧道开挖导致松动区扩大、土拱向上扩展引起,“群洞效应”导致隧道承载增加,建议隧道衬砌强度设计按照全覆土压力进行,应当在设计阶段加以注意。

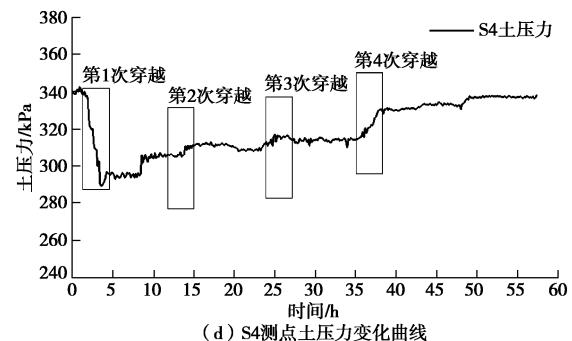
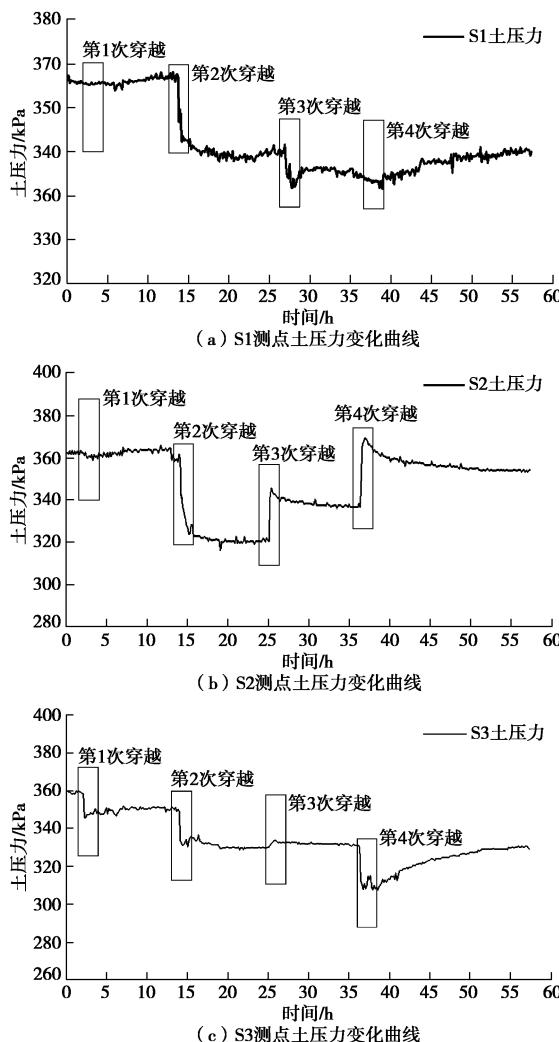


图5 非下穿区土压力变化

Fig. 5 Curves of soil pressure in non-crossing region

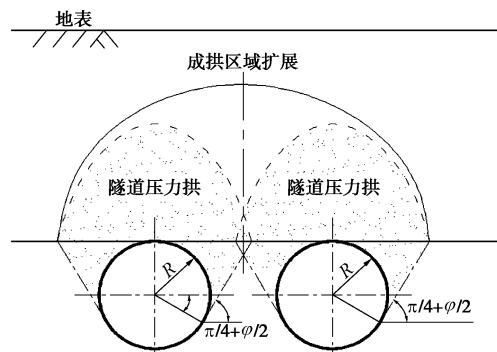


图6 非下穿区域“群洞效应”示意图

Fig. 6 “Group-hole effect” in non-crossing region

(2) 下穿区域土压力变化

如图7所示,盾构隧道下穿会引起既有隧道下方土压力突变。其中,新建隧道上方1.5倍洞径范围内土压力降低,而远侧土压力升高,影响范围可达3倍洞径以上,远大于常规掘进段。如图8所示,这种变形模式的主要原因在于:①既有隧道结构的存在影响土体变位向地表传播,从而产生横向发展;②隧道开挖引起隧道和土体协同变形,在隧道-土体相互作用下,既有隧道纵向弯曲导致土体应力分担发生变化。

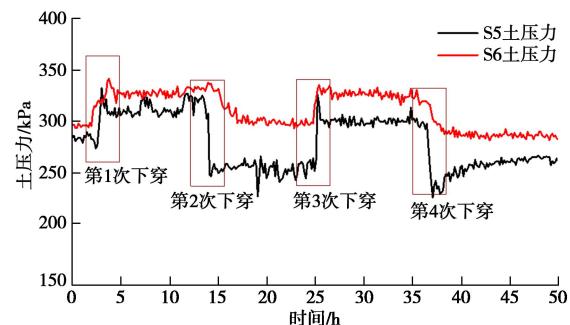


图7 下穿区土压力变化

Fig. 7 Curves of soil pressure in crossing region

(3) 既有隧道周围土体荷载变化

如图9为隧道下穿过程中既有隧道周围土压力荷载变化。由图9(a)可知,盾构下穿过程中拱底土压

力有突然高于原始应力水平现象出现, 而拱顶土压力则低于原始应力, 穿越完成后土压力均恢复到初始水平。结合穿越位置和顺序进行分析可知, 当盾构下穿位置距离监测断面较远时, 既有隧道拱顶土压力升高, 拱底土压降低, 相应的拱腰位置土压力升高; 当下穿位置距离监测断面较近时, 下穿引起既有隧道呈现上部拱顶土压降低而拱底土压力升高趋势, 相应的拱腰位置土压力降低。隧道受荷变化的主要原因在于隧道结构的弯曲变形, 土压力的变化综合反映了隧道结构与土的相互作用。

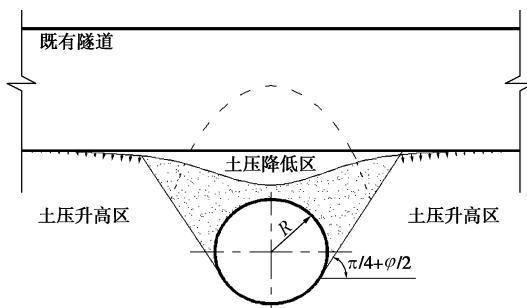


图 8 下穿区土压力变化模式

Fig. 8 Change mode of soil pressure in crossing region

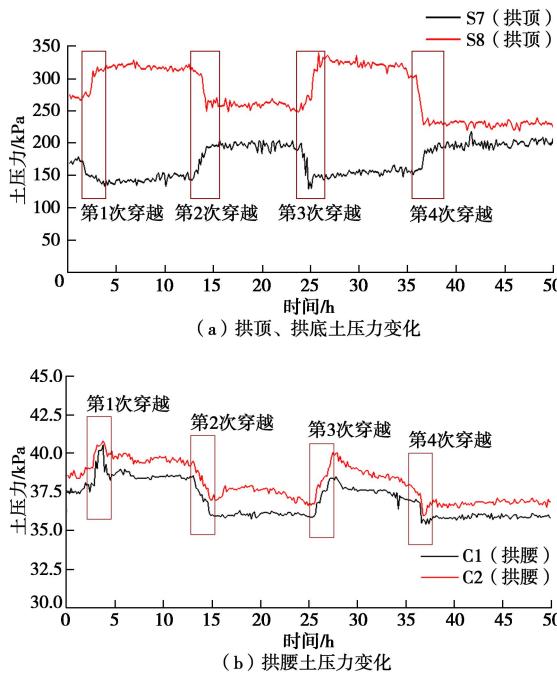


图 9 既有隧道周边土压力变化

Fig. 9 Curves of soil pressure around existing tunnel

3.2 既有隧道受力

(1) 隧道环向弯矩

表 4 给出了模型试验中各次穿越完成后既有隧道环向弯矩分布, 可以看出, 既有隧道弯矩最大值均位于隧道拱底位置, 新建隧道的开挖对既有隧道环向弯矩的影响不大, 弯矩变化不超过 10%, 4 次穿越完成

后既有隧道监测断面位置环向弯矩略有减小。穿越过程中, 隧道环向弯矩变化呈现出与周围土压力变化相一致的规律, 隧道开挖卸荷导致附近既有隧道环向弯矩降低, 影响范围约为 1.5 倍洞径, 松动区以外环向弯矩略有增大。

(2) 隧道纵向弯矩

如图 10 所示, 为盾构四次穿越引起既有隧道纵向弯矩变化。由图 10 可知, 随着穿越次数增加纵向弯矩增大明显, 4 次穿越后最大弯矩分别为 40.2, 52.0, 83.6, 124.5 kN·m, 最大弯矩位于四条隧道的中心正上方处。可见, 盾构下穿对既有隧道结构纵向受力极为不利, 这也是既有隧道结构产生纵向裂缝和渗漏水的主要原因。

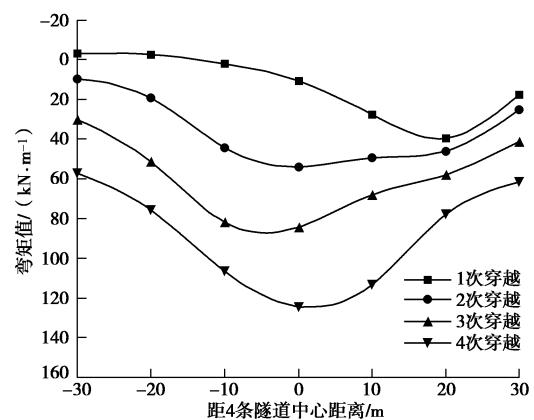


图 10 隧道纵向弯矩分布图

Fig. 10 Longitudinal bending moments of tunnel

3.3 既有隧道变形分析

如图 11, 12 所示, 分别为盾构下穿引起既有隧道沉降历时曲线和横断面沉降曲线。由图 11, 12 可知, 不同位置测点沉降规律相近, 既有隧道沉降随穿越次数的增加而增大, 穿越位置距离测点越近, 沉降变化越大, 距离越远, 沉降变化越小。4 次穿越完成后既有隧道沉降峰值分别为 6.3, 9.3, 10.5, 15.5 mm, 单次增幅 13%~48%, 横断面沉降呈现不对称沉降槽形式, 沉降峰值位置总是向新建隧道位置偏移, 穿越区域横向影响范围可达 60 m 以上。

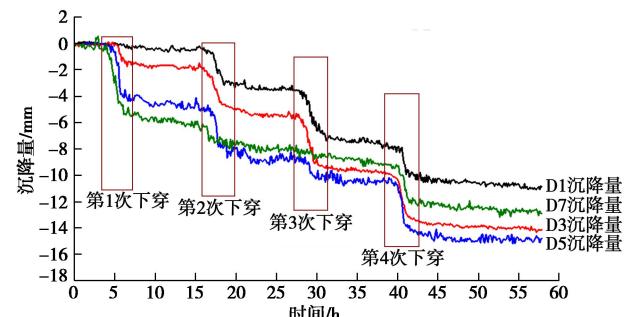


图 11 测点沉降历时曲线

Fig. 11 Settlement curves at measuring points

表 4 模型试验隧道弯矩图

Table 4 Moment diagrams of tunnel

(kN·m)

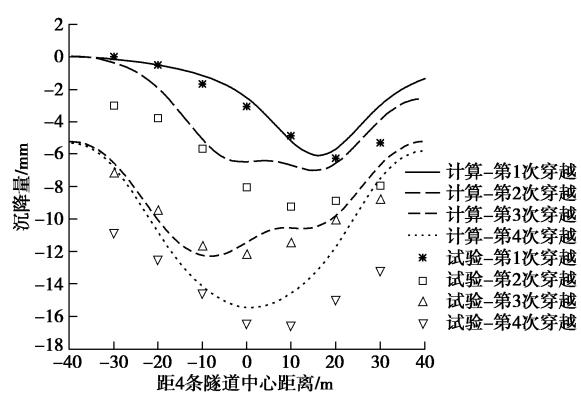
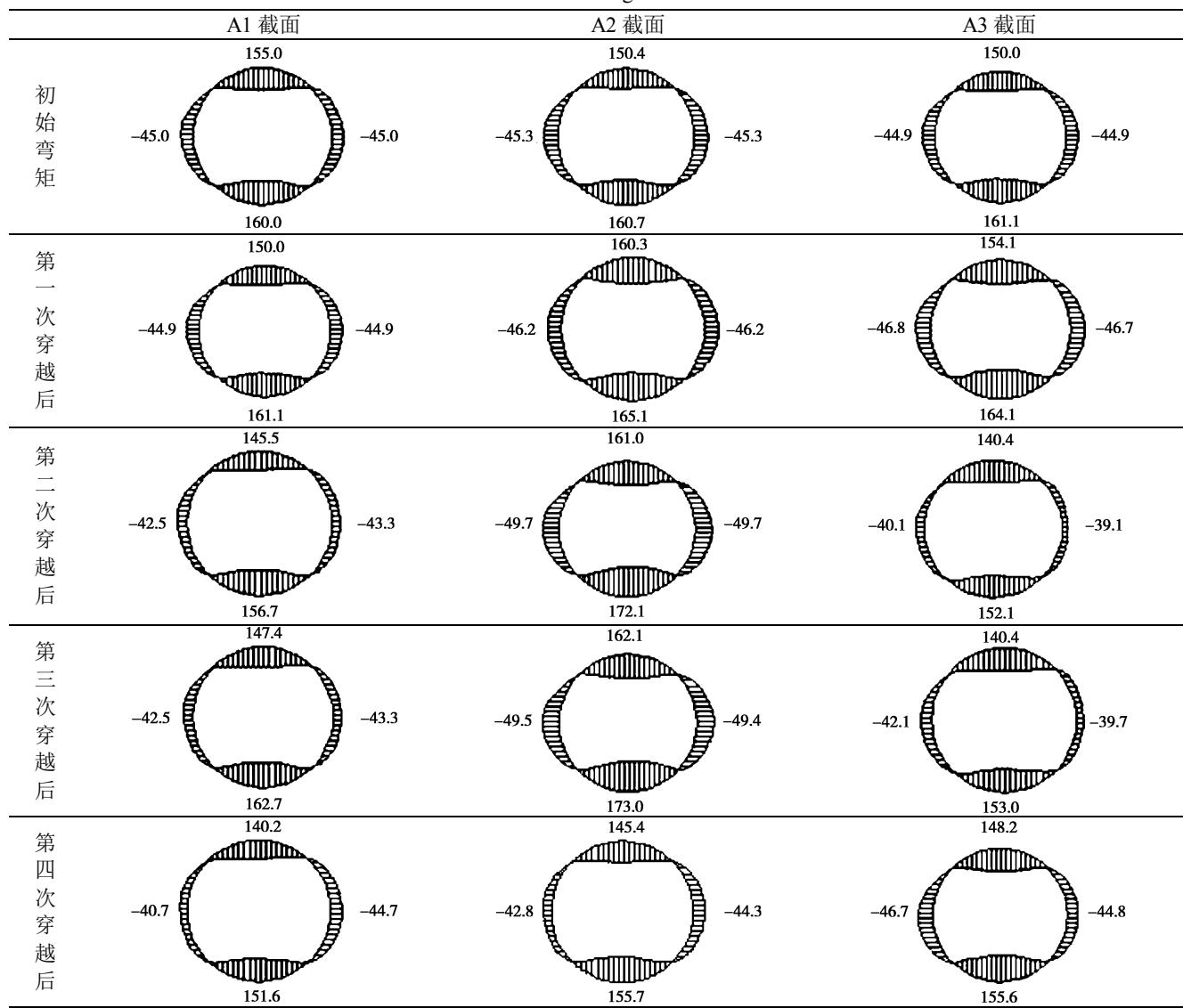


图 12 隧道沉降曲线

Fig. 12 Settlement curves of tunnel

模拟计算, 建模范围水平向取最外侧隧道中心线各 30 m, 垂直方向取新建隧道底部以下 35 m, 开挖长度为 60 m。隧道衬砌结构采用壳单元模拟, 地层选用莫尔库仑本构模型, 注浆层采用实体单元模拟, 整体计算模型如图 13 所示。

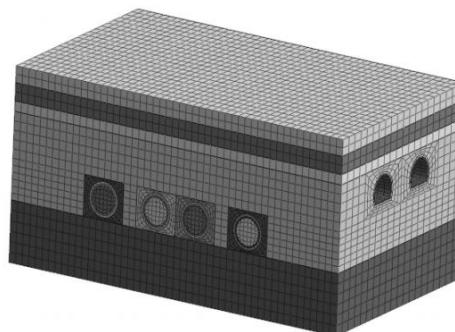


图 13 整体模型

Fig. 13 Numerical simulation model

4 数值模拟结果对比

4.1 模型建立

本文采用 FLAC^{3D} 有限差分程序对背景工程进行

4.2 施工过程模拟

结合盾构隧道施工全过程, 计算首先进行自重固结以形成开挖初期自重应力场, 引入荷载释放系数 $\alpha=25\%$ 以模拟盾尾推出瞬间外围围岩变形效应, 注浆层及管片环施作完成后, 外围围岩释放剩余 75% 荷载^[15]。

4.3 试验结果与计算结果对比

通过数值模拟得到既有隧道沉降和环向弯矩变化情况, 见表 5。如图 12 所示, 既有隧道沉降分布计算与试验结果近似, 但试验所得沉降分布具有显著的不对称性, 说明先建隧道扰动对后建隧道引起沉降分布有一定影响。既有隧道最大沉降随着穿越次数增加而增大, 环向弯矩受盾构下穿施工影响较小, 多次穿越环向弯矩变化均未超过 10%, 计算结果与试验结果具有一致性规律, 进一步说明了试验成果对于实际工程的可靠性。

表 5 数值计算与试验结果对比

Table 5 Comparison between simulated and test results

穿越次数	沉降量/mm		环向弯矩/(kN·m)	
	模型试验	数值模拟	模型试验	数值模拟
1	6.3	6.0	165.1	149.6
2	9.3	7.1	156.7	134.2
3	12.1	11.8	162.7	144.5
4	16.5	15.3	151.6	128.4

5 结 论

本文以深圳车公庙枢纽小净距隧道群平行下穿既有隧道工程为背景, 通过离心模型试验对盾构隧道近距离下穿引起的既有隧道的受力、变形以及土体应力变化规律进行了研究, 主要得到以下 5 点结论。

(1) 在非下穿区域, 小净距四线隧道开挖土压力变化主要由隧道开挖卸荷以及临近隧道施工土拱扩展两方面引起, 具有明显的“群洞效应”, 导致新建隧道承受竖向土压力随隧道群施工增加明显, 考虑到盾构多次扰动施工的复杂性, 建议采用全覆土土压力进行设计计算, 应在设计阶段加以注意。

(2) 在下穿区域, 盾构隧道下穿引起新旧隧道间的夹层土体应力突变, 新建隧道上方 1.5 倍洞径范围内土压力降低, 远侧土压力升高, 影响范围可达 3 倍洞径以上, 远大于常规掘进段。这种变形模式的主要原因在于: ①既有隧道结构的存在具有遮拦效应, 限制土体变位向地表传播, 导致其横向发展; ②隧道开挖引起既有隧道和土体协同变形, 在隧道-土体相互作用下, 既有隧道纵向弯曲导致土体应力分担发生变化。

(3) 盾构下穿引起既有隧道受荷发生变化, 当盾

构下穿位置距离监测断面较远时, 既有隧道拱顶土压力升高, 拱底土压降低, 相应的拱腰位置土压力升高; 当下穿位置距离监测断面较近时, 下穿引起既有隧道呈现上部拱顶土压降低而拱底土压力升高趋势, 相应的拱腰位置土压力降低。隧道受荷变化的主要原因在于隧道结构的弯曲变形, 土压力的变化综合反映了隧道结构与土的相互作用。

(4) 新建隧道的开挖对既有隧道环向弯矩的影响不大, 弯矩变化不超过 10%, 下穿过程中由于土体的卸载作用, 既有隧道临近位置环向弯矩会有所降低; 隧道开挖对既有隧道纵向弯矩影响较大, 随着穿越次数增加纵向弯矩明显增大, 4 次穿越后最大弯矩分别为 40.2, 52.0, 83.6, 124.5 kN·m, 穿越完成后最大弯矩位于 4 条隧道的中心正上方处。可见, 盾构下穿对既有隧道结构纵向受力极为不利, 这也是既有隧道结构产生纵向裂缝和渗漏水的主要原因。

(5) 既有隧道沉降量随着穿越次数的增加而增大, 下穿隧道距离测点越近, 沉降变化越大, 4 次穿越完成后既有隧道沉降峰值分别为 6.3, 9.3, 10.5, 5.5 mm, 单次增幅 13%~48%, 沉降峰值位置总是向新建隧道偏移, 沉降影响范围可达 60 m 以上。

参考文献:

- [1] 房明, 刘镇. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(1): 67-72. (FANG Ming, LIU Zhen. 3-D numerical simulation of influence of undercrossing shield construction on existing tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(1): 67-72. (in Chinese))
- [2] 孙钧, 刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 379-385. (SUN Jun, LIU Hong-zhou. 3-D numerical simulation of ground surface settlement under overlapped shield tunneling[J]. Journal of TongJi University (Natural Science Edition), 2002, 30(4): 379-385. (in Chinese))
- [3] 章慧健, 仇文革, 冯冀蒙. 小净距隧道夹岩力学特征分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 434-439. (ZHANG Hui-jian, QIU Wen-ge, FENG Ji-meng. Mechanical performance of shark rock of neighborhood tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 434-439. (in Chinese))
- [4] 张顶立, 黄俊. 深圳地铁浅埋暗挖隧道地层变形分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 88-93. (ZHANG Ding-li, HUANG Jun. Analysis of ground deformation for shallow tunnel in Shenzhen city[J]. Journal of China University of

- Mining and Technology, 2004, **33**(5): 88 - 93. (in Chinese))
- [5] 杨志勇, 江玉生. 盾构下穿地铁运营隧道沉降规律分析[J]. 西安科技大学学报, 2014, **34**(3): 268 - 273. (YANG Zhi-yong, JIANG Yun-sheng. Analysis on settlement regularity when shields underneath pass subway tunnels[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, **34**(3): 268 - 273. (in Chinese))
- [6] 汪 洋, 何 川, 曾东洋, 等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报, 2010, **32**(2): 79 - 85. (WANG Yang, HE Chuan, ZENG Dong-yang. Model test and numerical simulation of influence of perpendicular undercrosss shield tunnel construction on existing tunnel[J]. Journal of The China Railway Society, 2010, **32**(2): 79 - 85. (in Chinese))
- [7] MARSHALL A M, KLAR A, MAIR R J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(12): 1664 - 1672.
- [8] 黄德中, 马险峰, 王俊淞, 等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2012(3): 520 - 527. (HUANG De-zhong, MA Xian-feng, WANG Jun-song, et al. Centrifuge modelling of effects of shield tunnels on existing tunnels in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012(3): 520 - 527. (in Chinese))
- [9] 邵 华, 张子新. 盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 545 - 546. (SHAO Hua, ZHANG Zi-xin. Influence analysis on shield tunnel undercrosss nearby existing tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 545 - 546. (in Chinese))
- [10] 代翼飞, 孙 磊, 张 伟. 盾构隧道近距离下穿既有隧道的数值分析[J]. 土工基础, 2012, **26**(2): 13 - 15. (DAI Yi-fei, SUN Lei, ZHANG Wei. Numerical simulation of shield tunnel undercrossing existing tunnel nearby[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, **26**(2): 13 - 15. (in Chinese))
- [11] 白海卫, 何海健, 李 玲. 正交下穿施工对上部既有隧道安全的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, **10**(2): 434 - 439. (BAI Hai-wei, HE Hai-jian, LI Ling. Study on longitudinal deformation and internal forces of upper existing metro tunnel caused by undercrossing tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, **10**(2): 434 - 439. (in Chinese))
- [12] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, **13**(3): 289 - 304.
- [13] SOLIMAN E, DUDDECK H, AHRENS H. Two-and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1993, **8**(1): 13 - 18.
- [14] 凌 昊, 仇文革, 孙 兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2849 - 2853. (LING Hao, QIU Wen-ge, SUN Bing, et al. Study of adjacent construction of two tube shield tunnels by centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2849 - 2853. (in Chinese))
- [15] シールド工法の調査・設計から施工まで編集委員会. シールド工法の調査・設計から施工まで[M]. 東京: 地盤工学会, 1997. (Editorial Committee of Shield Method, from Investigation and Design to Construction. Shield method, from investigation and design to construction[M]. Tokyo: Geotechnical Society, 1997. (in Japanese))