DOI：10.16285/j.rsm.2017.04.026

多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究

张晓清[1]，张孟喜[1]，李 林[2]，李武祥[3]，王有成[1]

（1. 上海大学 土木工程系，上海 200072；2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092；
3. 中铁二十局集团有限公司，广东 广州 511400）

摘 要：多线叠交盾构隧道在地下空间内布置形式繁多，土体-隧道间相互作用机制复杂。针对多线叠交盾构垂直上穿、垂直下穿和上、下夹穿 3 种典型穿越施工形式，根据盾构隧道近距离施工的技术特点和控制要求，采用排液法重点分析了施工中因地层损失和开挖卸荷引起的地表沉降以及既有隧道纵向变形规律，并通过构建三维弹塑性有限元动态模型，与部分试验结果进行了对比验证。研究结果表明：上穿施工中，地表沉降较大，既有隧道均呈现上浮趋势；下穿施工时，地表沉降较小，既有隧道均呈现下沉趋势；先下后上穿越施工在各阶段引起的地表沉降变化均匀，最终地表沉降量相对较小；先上后下穿越施工时既有隧道变形曲线曲率大，既有隧道变形呈现反复震荡变化。成果可为类似多线叠交隧道工程的施工提供理论指导。

关 键 词：盾构隧道；多线叠交；模型试验；数值模拟；岩体变形

中图分类号：TU 473.1 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017)04－1133－08

Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling

ZHANG Xiao-qing[1], ZHANG Meng-xi[1], LI Lin[2], LI Wu-xiang[3], WANG You-cheng[1]

（1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway 20 Bureau Group Corporation, Guangzhou, Guangdong 511400, China）

Abstract: Multi-line overlapping shield tunnel has a complex form in underground space layout. The interaction mechanism between tunnels and soil is very complex. The new tunnel caused ground settlement and made adverse effects when traversing the existing tunnels. The drainage method model test was applied according to the technical requirements of shield tunneling and control requirements of approaching construction. The ground surface subsidence and the existing tunnels longitudinal deformation caused by strata damage and excavation unloading are analyzed for three typical construction methods, above-crossing, under-crossing and above-under crossing. Finite element model was built to simulate the dynamic construction process of model test. The results show that ground settlement turns to be larger, and the existing tunnels have an upward moving during the construction of up-crossing. While under-crossed, a smaller settlement with a tendency of subsidence is found in the existing tunnel. The under-crossing first and then above-crossing construction leads to a uniform variation in ground settlement during various construction stages, and the final settlement is relatively small. The above-crossing first and then under-crossing construction results in a great curvature in deformation curve of existing tunnel, and the deformation of existing tunnel fluctuates constantly. The research results can provide some theoretical basis and prophase guidance for similar projects in the future.

Keywords: shield tunneling; multi-line overlapped; model test; numerical simulation; geotechnical deformation

1 引 言

随着我国城市化进程不断加剧，城市流动人口不断增加，使得城市发展与交通资源之间短缺的矛盾日益突出，目前由于地面交通运输能力的限制，使得地上交通压力越来越大，城市地下空间资源的开发和利用成为可持续发展的重要方向之一。地铁具有高速、安全、载客量大、不受外部气候条件限

收稿日期：2015-05-27
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 41172238)；中铁二十局集团有限公司技术开发课题。
This was supported by the National Natural Science Foundation of China(41172238) and the Project Technology Development of China Railway 20 Bureau Group Corporation.
第一作者简介：张晓清，男，1987 年生，博士研究生，主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: zhangxiaoqing582@163.com
通讯作者：张孟喜，男，1963 年生，博士后，教授，主要从事岩土工程及地下结构方面的教学和研究工作。E-mail: mxzhang@i.shu.edu.cn

制、降低地面噪音、减少城市污染等特点，因此，修建地铁已成为当今解决城市交通拥挤最有效的手段之一。在实际施工中，由于地表建筑物、地下桩基、地埋管线以及运营地铁隧道等诸多因素制约，在隧道施工中将不可避免地出现超近距离穿越的特殊施工形式，甚至会出现多线叠交穿越的极端工况[1]。

目前，隧道施工中已经出现多线叠交工况，如：上海地铁2号线穿越地铁1号线，最小净距仅1.2 m；上海地铁4号线浦东南路站－南浦大桥站－西藏南路站区间隧道双线叠交，叠交长度达200 m；上海地铁11号线北段二期工程双线隧道分别从运营的地铁4号线隧道上、下方穿越，形成三层四线叠交的特殊工况[2]。在此类穿越净距小，叠交距离长的工况下进行盾构施工，存在极大的施工风险和安全隐患。因此，进行软土地区多线叠交盾构隧道近距离施工扰动机制的研究具有重要的理论和现实意义。

在盾构施工叠交区域，新建隧道的施工对周围环境的影响十分复杂，国内外学者针对软土地区盾构近距离施工扰动机制进行了较为丰富的研究。Kim[3]针对小间距隧道盾构施工中的相互影响进行了模型试验研究，重点研究了衬砌短期的变化行为。Ng 等[4]通过一系列离心模型试验分别对软黏土中单孔和双孔隧道开挖引起的地表沉降槽、超孔隙水压力的产生、隧道稳定性以及土拱效应进行了研究。朱合华等[5]以上海地区粉砂地层为参照原型，借助于模型试验方法，通过对盾构工作参数和地层特性参数进行不同的组合试验，研究了土压平衡盾构推进过程中顶进推力变化的规律以及土体与盾壳之间摩擦作用的机制及影响因素，并在此基础上推导了盾构千斤顶顶进推力的计算公式。Chehade 等[6]采用平面有限元模型分析了双孔隧道施工中的相互作用，重点考虑了隧道的3种相互位置（水平排列、斜向排列和垂直排列）以及施工先后顺序所产生的影响。凌昊等[7]通过室内离心模型试验模拟双孔盾构隧道近接施工，研究了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各隧道相对位置的变化规律。肖潇等[2]针对上海地铁11号线交叉穿越地铁4号线叠交的复杂穿越形式，运用三维有限元法模拟了多线叠交盾构隧道施工过程，对穿越期间地层损失进行了系统研究，并与监测结果进行对比验证，为工程实践提供理论基础。廖少明等[8]结合上海地铁某区间隧道上、下夹穿运营地铁的工程实例，采用数值模拟的方法，分别对先上后下、先下后上2种施工次序引起的地铁隧道变形和地层扰动影响进行了比较分析，并给出了合理施工建议。马险峰等[9]以上海典型软弱地层为背景，通过离心试验研究了地层损失与施工期及工后地表沉降的关系。

不难发现，目前国内外叠交隧道的研究仅局限于双线叠交，对近期出现的多线叠交问题还很少研究，对多线叠交近距离穿越施工扰动机制的研究更是鲜见。本文以重力环境下的物理相似模型试验为手段，研究3种不同穿越形式下多线叠交隧道近距离施工扰动机制，并通过构建三维动态有限元弹塑性模型，将数值模拟与部分模型试验结果进行对比分析，重点研究盾构施工引起的地层损失和开挖卸荷作用对地表沉降和既有隧道纵向变形的影响。

2 模型试验设计

2.1 模型材料

根据国际土力学及岩土工程学会岩土物理模拟技术委员会达成的共识，当模型尺寸的大小与模型土颗粒粒径的比值大于175时，模型土颗粒的变形趋势和颗粒运动的集聚效应较原状土相差不大[10]，故本试验取用普通砂土，其部分物理力学参数通过南京电力自动化设备总厂生产的SJ-1A型三轴剪力仪测量，试验分别做了4组围压不同的工况，围压分别为50、100、150、200 kPa，得出偏应力$(\sigma_1-\sigma_3)$与应变ε的关系曲线如图1所示。

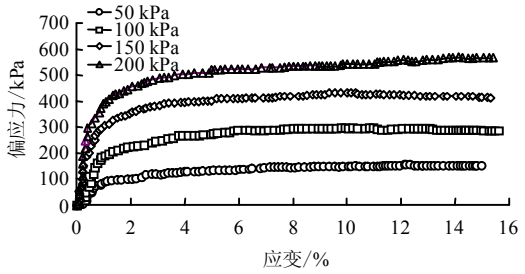


图1 偏应力与应变的关系曲线

Fig.1 Curves of deviatoric stress and strain

根据计算得出砂土的内摩擦角为35.4°，黏聚力为5.1 kPa。

考虑到试验模型箱的净尺寸（1 400 mm×640 mm×1 100 mm），取用1:40相似比，隧道结构采用聚乙烯（PE）管模拟。同时考虑管片接头处弹性刚度的折减效应及模型管片的制作难易，在环向接头处采用细螺栓与薄塑料片（PE片）固定连接的形式，接头尺寸及管片连接方式如图2所示，每2环管片之间通过6对12只螺栓相连，既有隧道结构为通缝拼装。

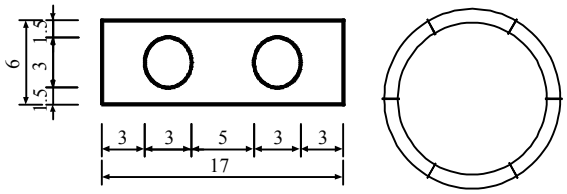


图 2　接头片尺寸及管片连接方式示意图 (单位：mm)
Fig.2　Schematic diagram of joint piece size and segment connection (unit: mm)

管片材料满足几何相似比（1:40）与弹性模量相似比的要求，考虑原型隧道必要的纵向刚度折减，使得制作完成后的既有隧道模型接头部位的弹性刚度系数能基本满足弹性刚度系数相似比的要求，原型隧道与相似模型隧道参数如表 1 所示。

表 1　原型隧道与模型隧道参数
Table 1　Parameters of prototype tunnel and model

类别	外径 /mm	管片厚度 /mm	环宽 /mm	弹性模量 /MPa
原型	6 400	350.0	1 200	32 500
模型	160	9.5	300	820

2.2　试验工况

试验分垂直上穿、垂直下穿以及上、下夹穿 3 种典型穿越形式，均假设既有隧道埋深为 550 mm，既有隧道之间的净距为 125 mm，新建隧道净距为 125 mm，与既有隧道之间的净距为 100 mm，3 种典型穿越工况的试验总体布置图如图 3 所示，地表及隧道变形数据均由激光位移传感器测得。试验布置中新建和既有隧道之间的净距均小于 1.5D（D 为隧道直径），属于日本隧道近距离施工规范中复杂叠交穿越工况形式[11]。

2.3　试验过程

为研究地铁盾构隧道多线叠交近接施工的扰动影响，采用 6 只预制乳胶膜袋放水的方法模拟盾构实际开挖过程中产生的地层损失。气动接头通过直径为 3 mm 的塑料导管与外部控制阀门连接，阀门连接有医疗输液器并外接有流量计，可相应控制每个乳胶膜袋的进出水流速，注水、排水过程采用液缸中的微型水泵实现。试验中采用预先在隧道模型内部放置水袋，并通过控制水袋排水来实现隧道开挖过程中的卸荷现象，试验模型示意图如图 4 所示。

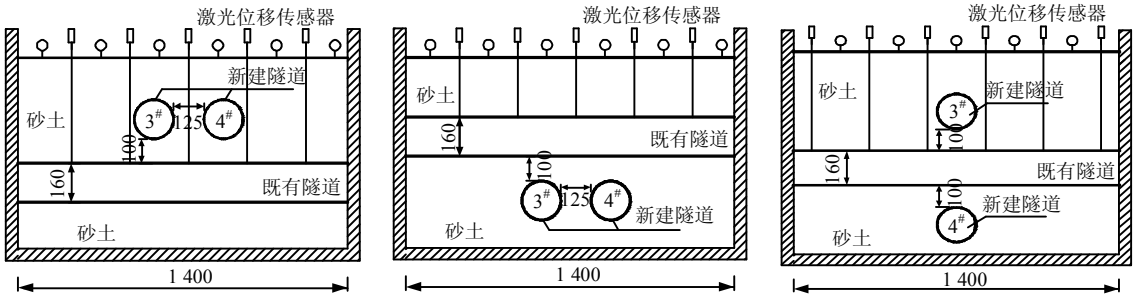


图 3　试验总体布置图（单位: mm）
Fig.3　Layouts of tests (unit: mm)

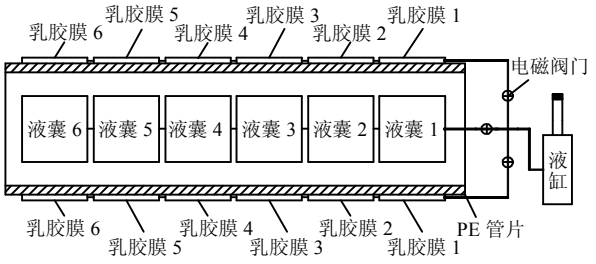


图 4　试验模型示意图
Fig.4　Sketch of the test model

在 3 种典型穿越形式试验工况下，根据上海盾构隧道施工经验，并考虑到试验过程的可操作性，施工引起地层损失率取最大经验值 2%，据此可算得每环注水囊袋中的放水量约为 50 mL。此外，试验中由于盾构开挖过程中因拼装管片置换出的土体引起的卸荷量，经计算约相当于 3 L 纯净水的排放重量。本次试验不考虑土体的实际分层，地表上部不加堆载，并且在开挖过程中未考虑同步注浆对沉降的影响。模型试验流程主要为：

（1）按图 3 方式连接试验装置，调节电磁阀门的流量调节器使排水速度达到 25 mL/min 为止。

（2）埋设压力盒、布置应变片，装填砂土至预设高度并逐层夯实，按照试验工况安放位移计，检测数据采集仪的通道是否完好无损。

（3）打开 1 号注液囊袋底部气动接头，排出第 1 环中注水，2 min 后第 1 环排水完毕；同时打开新建隧道模型表面乳胶膜 1 阀门，使水袋内的水缓缓排出，以模拟地层损失过程。

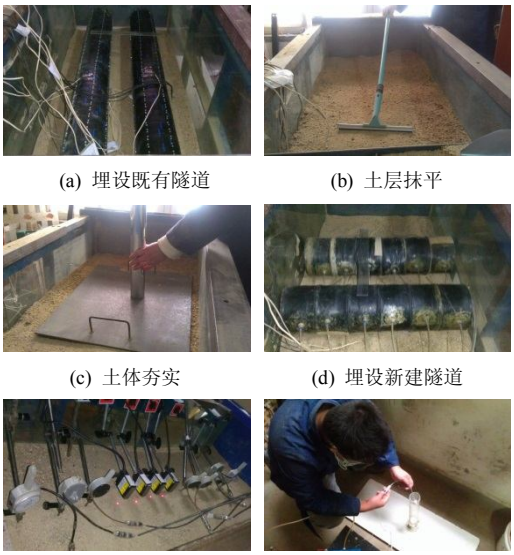
（4）重复步骤（3）的试验操作，依次完成第 2～6 环囊袋及 2～6 号乳胶膜的排水，此时即完成了第

1 条新建隧道的开挖模拟。

（5）重复步骤（1）、（2）的操作，再进行第 2 条新建隧道的开挖模拟。

（6）量测并记录隧道开挖过程中土压力、地表横向沉降、既有隧道纵向沉降及管片应变变化等数据，并整理作进一步分析。

试验过程中，以 100 mm 为一个推进长度排水，每环水袋放水 2 min，首先进行 3#隧道的开挖模拟，再进行第 4#隧道的开挖模拟，垂直上穿试验的主要流程如图 5 所示，其余工况类似。



(a) 埋设既有隧道 (b) 土层抹平

(c) 土体夯实 (d) 埋设新建隧道

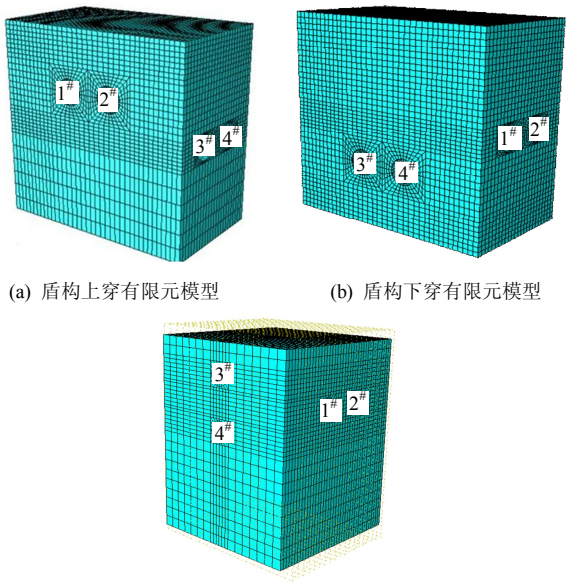
(e) 布置位移计 (f) 排水模拟开挖

图 5 垂直上穿工况试验流程

Fig.5 Testing process of up-crossing

3 三维有限元构建

通过有限元模拟对比分析部分试验结果，以验证模型试验的可靠性。采用有限元软件 ABAQUS 中单元生死技术以及改变材料参数的方法模拟盾构掘进的施工过程。按照试验尺寸，各工况三维有限元模型如图 6 所示，上穿和下穿除新建隧道 1#与 2#的埋深不同外，其他几何尺寸均相同。模型中，X 方向（横向地表方向）宽为 56 m，Y 方向（开挖方向）取 24 环管片宽度为 24×1.2 m=28.8 m，Z 方向（土体重度方向）深度为 60 m，整个有限元模型尺寸为：X×Y×Z =56 m×28.8 m×60 m。隧道衬砌均采用钢筋混凝土衬砌，为通用环楔形管片，管片混凝土强度 C55 级，混凝土抗渗等级为 S12。外径为 6.2 m，内径为 5.5 m，环宽为 1.2 m，管片厚为 350 mm。等代层厚度取为 0.105 m。假设既有隧道埋深为 22 m，既有隧道之间的净距为 5 m，新建隧道之间净距为 5 m，其与既有隧道之间的净距为 4 m。



(a) 盾构上穿有限元模型 (b) 盾构下穿有限元模型

(c) 盾构上、下夹穿有限元模型

图 6 盾构穿越有限元模型

Fig.6 FEM models of shield crossing

土体本构选用 Drucker-Prager 模型，衬砌采用弹性模型，并考虑螺栓连接，将其纵向刚度乘以 0.85 的折减系数[12]，等效层采用弹性模型，通过 SOIL 分析步中的时间步长来考虑盾构推进及排水固结的时间效应。材料参数详见表 2 和表 3。

表 2 土和衬砌物理参数

Table 2 Properties of soil and lining

名称	μ	E/MPa	r/(kN/m^3)	c/kPa	φ/(°)	K/(m/s)
土	0.26	10.47	19.4	5.1	35.4	0.026×10^{-7}
衬砌	0.20	32 500.00				

注：μ为泊松比；E 为弹性模量；r 为重度；c 为黏聚力，φ 为内摩擦角，K 为渗透系数。

表 3 等代层参数

Table 3 Properties of equivalent circle zone

等代层	E/MPa	K/(m/s)
step1	0.2	1.1×10^{-8}
step2	2.0	0.6×10^{-8}
step3	18.0	0.2×10^{-8}

4 结果分析

4.1 地表沉降分析

地表沉降值可通过在地表位置等间距布置的 11 只精度为 0.1um 的激光位移传感器测量得到。将所得的位移随时间变化的试验数据进一步处理，可得盾构施工引起的地层损失和开挖卸荷共同影响下地表沉降随地表横向位置变化的变形趋势，3 种工况下的地表沉降曲线如图 7 所示（为说明方便，试验结果已换算成足尺值，下同）。

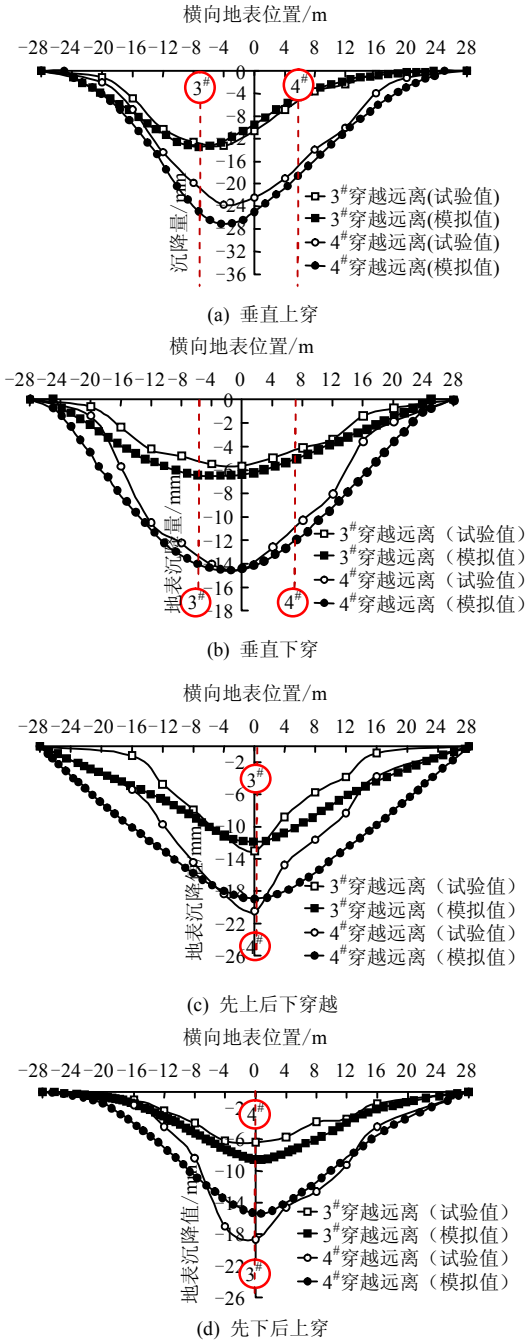


图 7　3 种工况下横向地表沉降曲线

Fig.7　Ground settlements caused by three types of construction

4.1.1 垂直上穿和垂直下穿工况

由图 7(a)可知，在 3#和 4#隧道开挖过程中，地层损失与开挖卸荷作用对地表沉降影响较大，3#隧道穿越远离后，地表沉降达到单线开挖情况下的最大值，约为 14 mm，这与数值模拟结果较为接近；而在 4#隧道穿越过程中，地表沉降变化趋势与 3#隧道穿越期间相似，但由于各条隧道间相互制约的影响，隧道周边地层处于多次扰动状态，该条件下的施工扰动表现为土体应力释放，因此，地表沉降值要大于 3#新建隧道穿越施工后的地表沉降值，在 4#新建隧道穿越远离后沉降值发展到最大值，约为 24 mm，试验结果与数值模拟结果吻合程度较好。由图 7(b)可见，模型试验与有限元模拟结果基本吻合。垂直下穿引起地层变形趋势与垂直上穿相类似，总沉降量略小于垂直上穿沉值降，并且可以看到，地表沉降槽宽度较上穿施工沉降槽宽度略大，这是因为垂直下穿施工中，上部 2 条既有隧道刚度远大于土体刚度，隧道开挖释放的地应力一部分由上方既有隧道承担。还可看出，当 4#新建隧道穿越远离后地层变形会发生明显变化，这是由于 4#开挖造成的二次扰动加剧了地应力的释放；垂直下穿施工后沉降槽中线位置也会发生偏移现象，但较垂直上穿的偏移量要小，大致位于 2 条新建隧道的中间，这也是由于既有隧道纵向刚度的存在减弱了盾构施工对周围土体的扰动。

4.1.2 上、下夹穿工况

从图 7(c)、7(d)可以看出，2 种穿越次序下地表沉降值略有差别，但相差不大，先上后下穿越试验值约为 20.1 mm，先下后上穿越条件下试验值约为 19.1 mm。但先上后下穿越顺序下，穿越阶段转换分界处横向地表沉降累计值与单次变化量明显会变大。从穿越各阶段位移变化结果来看，先下后上穿越施工在各阶段引起的地表沉降变化均匀，而先上后下穿越在 4#新建隧道施工开始会引起位移突变，这对地表建（构）筑物的保护较不利，且先下后上穿越顺序下，地表沉降槽宽度相对较大，位移曲线变化较为平缓。因此，从试验结果来看，从控制地表沉降减轻建筑物破坏的角度出发，应优先采取先下后上的施工方式。表 4 所示为 2 种穿越顺序下地表竖向位移值的比较。

表 4　2 种穿越顺序下地表竖向位移值的比较

Table 4　Comparison of surface vertical displacement with two different sequences

穿越次序	累计值/mm	单次最大变化量/mm
先上后下	−20.1	−8.4
先下后上	−19.1	−11.9

4.2　隧道变形分析

通过埋设土体内部位移计的方法测量既有隧道的纵向变形。土体内部位移测量方法是采用自制的位移计，实物图如图 8 所示。

进一步处理各位移计随时间变化的试验数据，即可得到因盾构施工引起的地层损失与开挖卸荷共同影响下既有隧道随纵向位置变化的变形趋势图，因位移计布置空间所限，笔者在测量过程中取 8 个点的数据，得到隧道沉降随位置变化的变形曲线，

如图 9～12 所示。

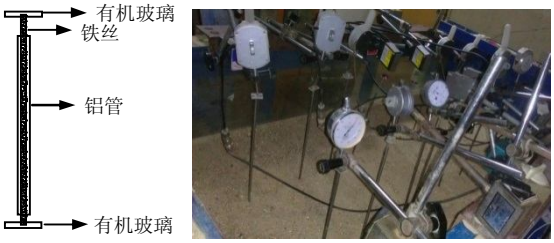


图 8 土体内部位移计简图及实物图

Fig.8 Schematic and real figure of internal displacement meter

4.2.1 垂直上穿工况

由图 9 可知，在垂直上穿过程中，1#和 2#既有隧道均表现为明显的上浮趋势，4#新建隧道穿越完成后，2 条既有隧道上浮值在 3#穿越完成后持续增加。这是由于在后开挖 4#隧道时，既有隧道和先建隧道间的影响较为明显，周围地层受到多次施工扰动影响。在 4#新建隧道穿越远离后，2 条既有隧道上浮量达到最大，且既有隧道最大上浮值产生于 2 条新建隧道的中部，这主要是由于既有隧道自身刚度对上浮值及上浮位置的分布影响较大，由于隧道刚度对土体的约束作用，使最终变形趋向于对称分布。

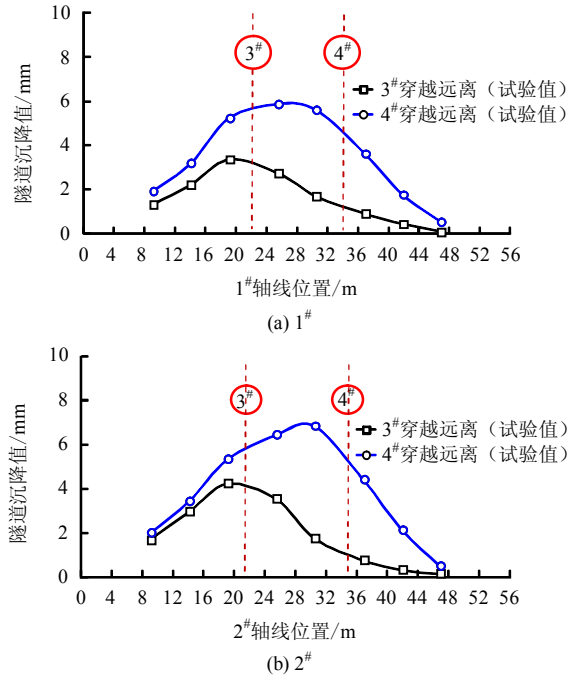


图 9 垂直上穿既有隧道纵向位移曲线

Fig.9 Longitudinal deformations of existing tunnel caused by shield above-crossing

4.2.2 垂直下穿工况

由图 10 可见。盾构垂直下穿施工中，既有隧道均呈现出下沉趋势，1#隧道的最大下沉值较 2#既有隧道大，最大下沉值产生于 4#新建隧道穿越完成后，并且 2 条既有隧道下沉位置的最大值产生在略偏于先行开挖隧道的正上方，该变形趋势表明，隧道的先行施工扰动作用对既有隧道变形影响的贡献比较大。与此同时，垂直下穿对既有隧道的影响较垂直上穿施工略大，变形均大于上穿施工时既有隧道上浮值。因此，在实际施工过程中，若对既有隧道变形控制有较高要求时，2 种穿越方式对比后建议采用上穿方式较为合理。

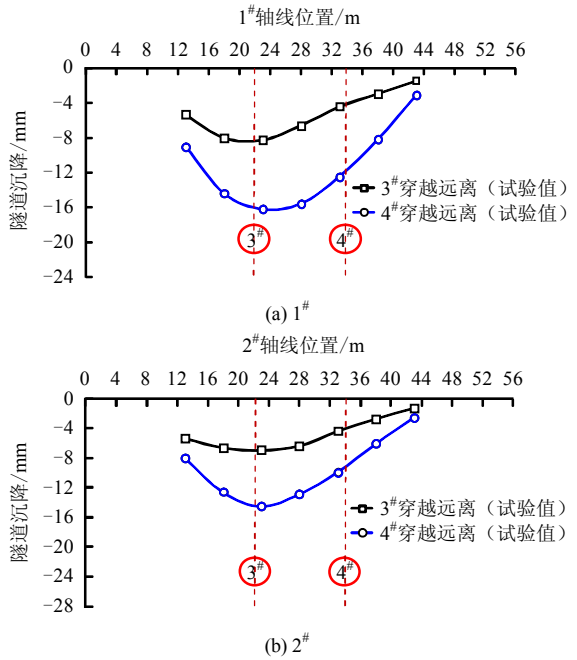


图 10 垂直下穿既有隧道纵向位移曲线

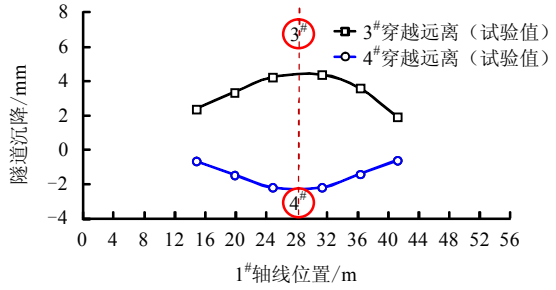
Fig.10 Longitudinal deformations of existing tunnel caused by shield under-crossing

4.2.3 上、下夹穿工况

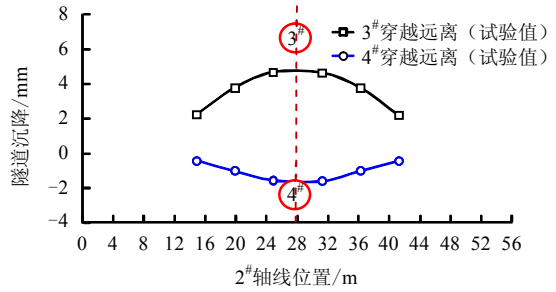
由图 11(a)可见，先上后下的穿越次序在上穿阶段隧道均呈现上浮趋势，由于受到隧道本身刚度的影响，既有隧道位移比较平缓，没有出现类似地表沉降显著的局部凹槽。从图中还可以看到，当 4#穿越接近阶段，1#在原有变形基础上产生大幅下沉，但此时总体仍然呈上浮趋势。4#穿越阶段时，1#才到达下沉状态。这是由于 1#受到先期施工扰动较大，在下穿阶段引起的下沉较大，单次最大变化量达到最大。穿越结束时 1#最大下沉量的试验值约为 2.2 mm，最大下沉位于既有隧道中心位置。

由图 11(b)可以发现，由于 2#距离 2 条新建隧道穿越远离阶段较近，因此，与 1#既有隧道不同之处在于 4#新建隧道在穿越远离阶段最终呈下沉状态，最大下沉试验值约为 1.8 mm，并且最大下沉也位于

既有隧道中心位置。



(a) 1#



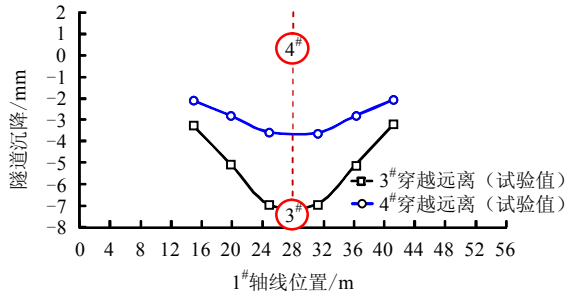
(b) 2#

图 11　先上后下穿越既有隧道纵向位移曲线

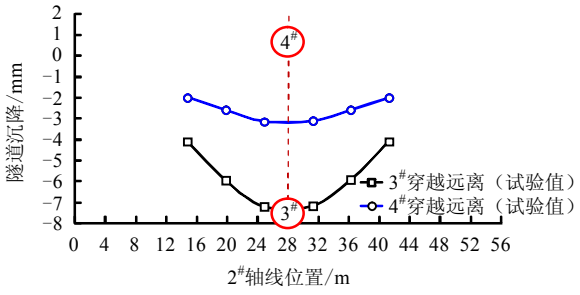
Fig.11　Longitudinal deformations of existing tunnel caused by during sequence of upper-crossing first and then lower-crossing construction

由图 12 分析先下后上穿越 2 条既有隧道纵向位移曲线，在新建隧道采用先下后上穿越形式时，既有隧道的变形趋势为先下沉后上浮，但在卸荷完成后隧道的最终状态均表现为下沉形式。图 12(a)可见，3#新建隧道穿越阶段对于 1#既有隧道上浮值贡献较大，穿越完成后最终沉降试验值约为 3.7 mm；而 2#既有隧道在 3#穿越阶段下沉趋势明显，单次最大变化量达到最大值，约为 4.3 mm。上穿开挖阶段对隧道变形的贡献较小，4#新建隧道穿越结束时，2#既有隧道的最终下沉试验值约为 3.1 mm。2 种不同穿越形式下既有隧道纵向变形的对比结果如表 5 所示。

对比 2 种穿越顺序，先下后上穿越下既有隧道累计位移值较大，而单次位移变化量较小。先下后上的穿越过程中，既有隧道沉降呈现不断发展再不断回弹至最终较小的沉降值的发展趋势。相比于先上后下穿越中变形呈现的反复震荡变化，先下后上穿越下位移的渐近式发展对隧道的变形控制更为有利。此外，2 种穿越次序下隧道结构的最终竖向位移值虽相差不大，但二者引起的变形曲线分布区别较大：先上后下穿越时的既有隧道变形曲线曲率较大，这对既有隧道结构的受力非常不利（如隧道的渗漏问题）；而先下后上穿越引起的变形曲线变化趋势较平缓。



(a) 1#



(b) 2#

图 12　先下后上穿越既有隧道纵向位移曲线

Fig.12　Longitudinal deformations of existing tunnel caused by during sequence of lower-crossing first and then upper-crossing construction

表 5　2 种穿越顺序下既有隧道纵向变形的试验值比较

Table 5　Comparison of trial values of existing tunnel longitudinal deformation with two different sequences

穿越顺序	累计值/mm		单次最大变化值/mm	
	1#	2#	1#	2#
先上后下	−2.2	−1.8	−7.0	−6.9
先下后上	−3.7	−3.1	3.5	4.3

综合考虑先上后下和先下后上 2 种穿越情形下，盾构穿越施工引起的地表位移和既有隧道变形分布规律可知，同等施工水平条件下，先下后上穿越方案对运营隧道的保护有利。

5　结　论

（1）盾构施工引起的地层损失及卸荷作用将会造成地表不同程度沉降，盾构垂直上穿对地层变形的影响较垂直下穿施工大，处于盾构隧道叠交段周围的土体，由于受到多次施工扰动影响，加之隧道自身刚度的约束影响，垂直上穿、下穿 2 种施工工况下的沉降槽均出现了略微偏移。

（2）上穿过程对地表沉降影响较大，但与既有隧道的影响相比，地表沉降相对较小；而下穿过程对地表沉降影响较小，对既有隧道的影响相对较大；

在穿越地表存在重要建筑物时，建议采用下穿施工方式，但在对既有隧道保护要求较高的区段，建议采取上穿施工较为合理。

（3）对于2种不同夹穿穿越顺序下引起的既有隧道最终变形较为接近，但先上后下工况下单次位移变化量要偏大；先下后上的穿越过程中，既有隧道沉降呈现不断发展，再不断回弹至最终较小沉降值的变化趋势，而先上后下穿越中，既有隧道变形则呈现反复震荡变化；先上后下穿越时的既有隧道变形曲线曲率较大，而先下后上穿越引起的变形曲线变化趋势较平缓。

（4）在叠交穿越施工中遇地表有重要建筑物的区段或对地面建筑有较高保护要求时，建议采用垂直下穿施工或先下后上的穿越施工方式；在对既有隧道变形控制要求较高的叠交穿越施工中，宜优先采用垂直上穿或先下后上穿越的施工方法，以更好保证盾构施工安全。

参 考 文 献

[1] 李磊, 张孟喜, 吴惠明, 等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1036－1043.
LI Lei, ZHANG Meng-xi, WU Hui-ming, et al. Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunneling on deformation of existing tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1036－1043.

[2] 肖潇, 张孟喜, 吴惠明, 等. 多线叠交盾构施工引起土体变形数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 884－889.
XIAO Xiao, ZHANG Meng-xi, WU Hui-ming, et al. Numerical simulation analysis on ground settlements caused by multi-line shield tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(5): 884－889.

[3] KIM S H. Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, 19(4－5): 448－452.

[4] NG C W W, LEE K M, TANG D K W. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(3): 523－539.

[5] 朱合华, 徐前卫, 廖少明. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1587－1594.
ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming. Experimental study of thrust force during tunnel excavation with earth pressure balance shield machine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1587－1594.

[6] CHEHADE F H, SHAHROUR I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(2): 210－214.

[7] 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.

[8] 廖少明, 杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 812－818.
LIAO Shao-ming, YANG Yu-heng. Deformation analysis and control of a running subway crossed by upper- and lower-shield in succession[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(5): 812－818.

[9] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 等. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 942－947.
MA Xian-feng, WANG Jun-song, LI Xue-yun, et al. Centrifuge modeling of ground loss and settlement caused by shield tunneling in soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(5): 942－947.

[10] 孙吉主, 肖文辉. 基于透明土的盾构隧道模型试验设计研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 108－112.
SUN Ji-zhu, XIAO Wen-hui. Design on model test of shield tunneling in transparent soil[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2011, 33(5): 108－112.

[11] 日本隧道技术协会. 既有铁路隧道近接施工指南[M]. [出版地不详]: [出版者不详], 1997.
Japan Tunnelling Technology Association. Guide for construction of existing railway tunnel[M]. [S. l.]: [s. n.], 1997.

[12] 郑刚, 邓旭, 刘庆晨. 承压含水层减压降水对既有盾构隧道影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 178－188.
ZHENG Gang, DENG Xu, LIU Qing-chen. Analysis of responses of existing shield tunnel to pressure-relief in confined aquifer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 178－188.