

地铁盾构隧道管片明挖法修复施工的数值分析

崔丽艳¹ 崔涛² 邱俊宏¹ 陈斌¹

(1. 许继电气股份有限公司, 461000, 许昌; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 300142, 天津//第一作者, 工程师)

摘要 某地铁区间隧道在盾构施工过程中发生漏水事故, 致使区间右线隧道被淹、管片破损。对该区间隧道的损坏情况、损坏范围进行鉴定, 提出采用明挖法进行修复的方案。为防止全回转钻机切割管片时产生的较大压应力和剪应力对邻近管片产生破坏, 采用有限元软件 ABAQUS 建立三维有限元模型, 分析全回转钻机切割管片对邻近完好隧道管片安全性造成的影响, 以期今后地铁盾构隧道施工中出现类似情况时制定抢险方案提供参考。

关键词 地铁隧道; 漏水事故; 明挖法修复方案; 管片数值分析

中图分类号 U25

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.025

Numerical Simulation of Open-cut Repair Construction for Metro Shield Tunnel Segment

CUI Liyan, CUI Tao, QIU Junhong, CHEN Bin

Abstract A water leakage accident happened in one metro section during tunneling, leading to the right line flooding and the segment damage. After identifying the condition and scope of the damage, a repairing scheme that adopts open-cut method is proposed. To prevent the large compressing stress and shearing stress in the neighboring segments caused by the 360° rotator when cutting the segments, a 3D finite element model is established by using the software ABQUS, which could analyze the impact of 360° rotator on the intact segments in the neighboring tunnel during tunneling, aiming to provide a reference for the making of emergency plans against similar water leakage accident in the future.

Key words metro tunnel; leakage accident; open-cut repair construction; segment numerical analysis

First-author's address XJ Electric Co., Ltd., 461000, Xuchang, China

地铁隧道工程事故发生后, 大部分均采用明挖法对破损段隧道进行修复, 进而将明挖修复段隧道与完好段隧道连接为整体^[1-3]。在修复过程中, 明

挖修复段地下连续墙要穿过既有盾构管片, 工程中常采用全回转套管钻机进行管片切割、破碎和拔除。在需要施工地下连续墙的区域, 将隧道内部用砂浆填充密实, 用全回转套管钻机作为切割设备, 将套管压入土体, 利用冲抓斗抓除套管内土体; 挖至隧道管片位置后, 利用重锤将管片进行破碎后抓出^[4]; 然后回填土体, 并采用双高压旋喷对填充体进行低强度加固处理。

在管片切割作业过程中, 因钻进过程中压入力和冲砸的影响, 存在对修复段外侧完好隧道造成损坏的可能。对修复段外邻近未破损管片进行有效保护, 防止切割过程中对未破损管片进行破坏, 是修复方案的难点。

有限元数值方法可以反映复杂的土体应力应变关系、结构与土体的相互作用, 以及模拟实际的施工过程, 是研究解决工程问题中结构受力和变形的有力工具^[5-7]。因此, 本文利用有限元软件 ABAQUS 模拟修复段管片切割对邻近完好隧道管片的影响, 以期今后地铁盾构隧道出现类似情况时制定方案提供参考。

1 工程事故概况

某地铁盾构隧道区间(见图1)自A站始发至B站接收, 区间内设置一处联络通道兼泵房。盾构区间线间距约为15 m, 纵断面采用“V”字坡, 最大纵坡坡度为2‰, 隧道顶部覆土深度为8~17 m。

隧道穿越地层范围内自上而下分别为⑥4粉质黏土、⑦粉质黏土、⑧1粉质黏土。盾构区间主要处于⑦、⑧1粉质黏土层, 夹⑧2砂质粉土(透镜体)。

在A-B区间右线掘进至第345环时, 发生透水险情, 进一步发展成涌水、涌砂事故, 隧道发生破坏, 并引起地表大面积沉降。漏水事故抢险完成后, 需对右线漏水段隧道进行修复。拟采用明挖法修复破损的管片。修复之前需首先对区间管片进行探查, 进而确定明挖修复段的长度。区间右线共布设了15个断面, 其中盾构机范围布置2个断面,

已施工盾构区间布置 13 个断面,如图 2 所示。

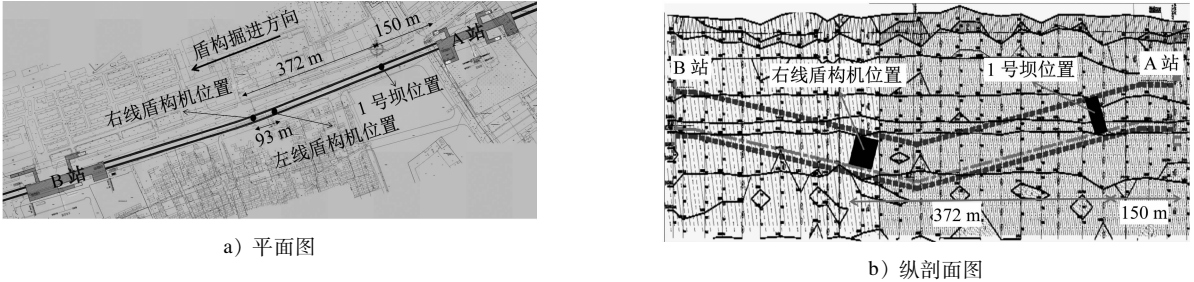


图 1 隧道 A-B 区间平剖面图

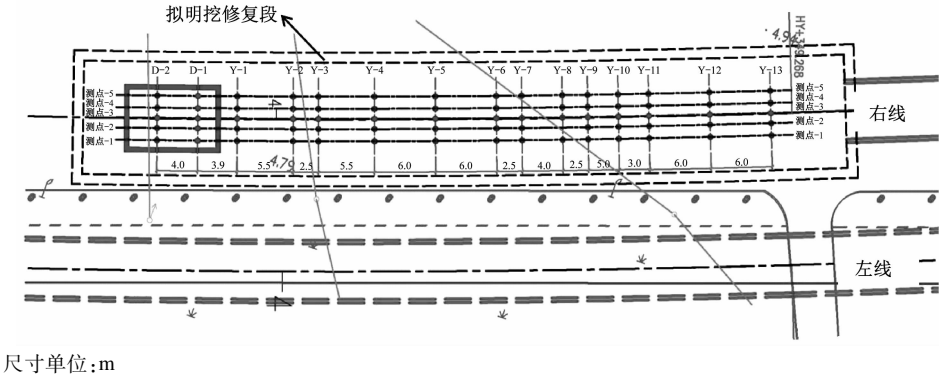


图 2 隧道修复段管片监测点位布设

盾构机及台车长度为 65 m,因此确定明挖修复段长度为 75 m。修复段基坑宽度为 10.8 m,深度为 22 ~ 24 m,采用 1.2 m 厚 T 型幅地下连续墙作为围护结构。地下连续墙与隧道交接处采用全回转钻机进行切割。

2 数值模型的建立

采用有限元软件 ABAQUS^[8] 建立三维数值模型,如图 3 a) 所示。模型计算域横向(*X* 轴向)长度为 60 m,纵向(*Y* 轴向)长度为 120 m,深度(*Z* 轴向)为 60 m。根据文献[9]的研究,该计算域尺寸基本满足低空旷场地条件下盾构掘进模拟的边界效应影响的要求。模型网格划分如图 3 b) 所示,土体网格共 38 856 个实体单元,网格类型为 C3D8R。管片结构网格共 800 个壳单元,网格类型为 S4R。

地下连续墙厚度为 1.2 m,深度为 52 m。既有隧道覆土厚度平均为 17.2 m,左、右线隧道中心距为 15 m,隧道外径为 6.2 m,管片宽度为 1.5 m。隧道内一定范围内填充 M10 水泥砂浆。钻机直径为 2 m。根据土拱效应,按照从中间到两侧的开挖切割顺序依次施工,分别为顺序 1、顺序 2(近左线侧)、顺序 3,如图 4 a) 所示。

模型中土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构关系,根据地质勘察报告,采用总应力指标,共分成 7

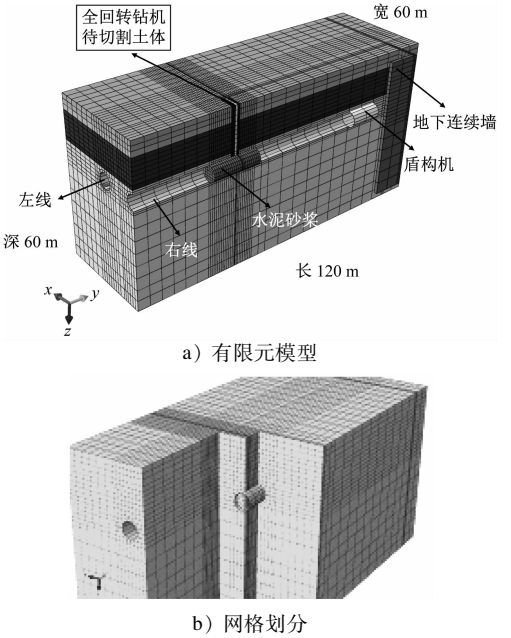


图 3 隧道修复段有限元模型及网格划分

层土,土层物理力学参数见表 1。隧道管片(C50)及地下连续墙(C30)、水泥砂浆(M10)均采用线弹性本构关系,既有盾构机也采用线弹性本构关系。土体与结构物的接触均采用摩擦接触,切向摩擦系数取 0.3,法向为硬接触。模型的边界条件如下:模型顶面为自由面,无约束;模型底面每个方向均约束;模型 4 个侧面均只法向约束,其余方向自由无

约束。

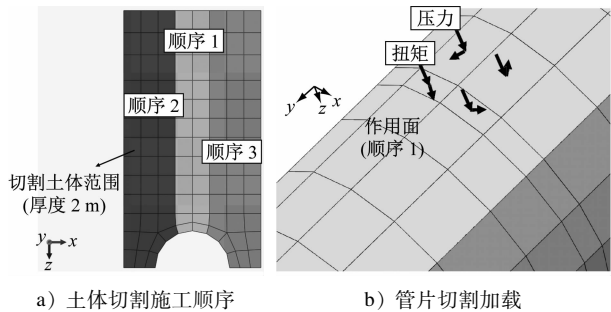


图4 钻机切割隧道管片示意图

表 1 数值模型土层主要物理力学参数						
土层	重度/ (kN/m³)	三轴固结不		压缩模 量/MPa	泊松 比	静止侧 压力 系数
		排水剪试验				
		黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)			
①素填土	18.73	10.71	17.9	3.6	0.35	0.69
④粉质黏土	19.59	21.00	19.6	4.1	0.30	0.66
⑥粉质黏土	18.95	17.00	22.8	4.3	0.28	0.61
⑦粉质黏土	20.10	17.00	21.5	5.2	0.28	0.63
⑧1 粉质黏土	19.99	20.87	15.7	6.1	0.27	0.73
⑧2 粉土	21.20	13.62	34.6	17.9	0.26	0.43
⑨1 粉土	20.04	23.50	15.3	5.6	0.27	0.73

管片混凝土的强度等级为 C50,厚度为 350 mm。根据修正惯用法^[10](将管片接头部分弯曲刚度的降低等效为管片环整体弯曲刚度的降低,并引入管片刚度有效率 η 和弯矩传递系数 ζ 来考虑接头造成的管片刚度降低与接缝拼装的影响),采用线弹性的 S4R 壳单元按整体结构计算。根据文献[11]对软土地区的试验研究,取 $\eta=0.75$ 来考虑本工程中管片错缝拼装的影响,管片的弹性模量和泊松比分别取 25.9 GPa 和 0.2。

模型的工序流程如下:①地应力平衡(包括地下连续墙和隧道的生成);②右线隧道内注入水泥砂浆;③开挖顺序1土体(根据施工方案,施加钻机压力 400 kN 和扭矩 3 000 kNm,具体形式见图 5);④切除顺序1管片;⑤开挖顺序2土体(根据施工方案,施加钻机压力 400 kN 和扭矩 3 000 kNm);⑥切除顺序2管片;⑦开挖顺序3土体(根据施工方案,施加钻机压力 400 kN 和扭矩 3 000 kNm);⑧切除顺序3管片。

3 模拟结果分析

3.1 隧道变形

图 5 为钻机加载后管片扭曲变形的示意图(扭矩作用方向为逆时针方向,扭矩作用时刻为开挖顺

序1土体后,切除顺序1管片前)。图 6 依次显示了隧道在初始地应力平衡后以及全部管片切割完成后,隧道竖向位移 $U3$ 、环内水平向位移 $U1$ 、环间水平向位移 $U2$ 的云图。由图 6 可见,由于在切割前对隧道内一定长度范围内进行了水泥砂浆的填充,对隧道管片的变形起到了一定的抑制作用,所以隧道管片施工前后沿各个方向的位移变化并不明显,均未超过 5 mm。

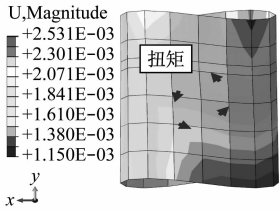


图5 钻机加载后管片变形示意图

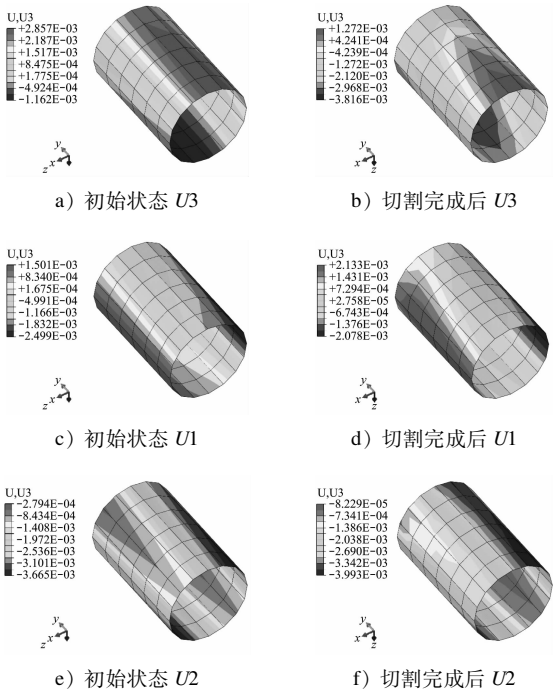


图6 受保护侧隧道(完好侧)施工前后变形对比

3.2 隧道弯矩

为更清楚地表明不同管片环的内力情况,图 7 ~10 均采用透视图进行显示。对于隧道弯矩,主要对比分析了初始地应力状态下、第一钻加载后、第一钻切割完成后、最后一钻切割完成后等 4 种情况。

从图 7 a) 和图 7 b) 可以看出,钻机竖向荷载(400 kN)比原覆土荷载(1 400 kN)小,相当于有竖向卸载,故主要影响因素为钻机切割扭矩。从图 7 c) 和图 7 d) 可以看出,由于管片切割以后,隧道衬砌结构的整体性降低,隧道平面内最大弯矩出现小

幅提高(增幅约17%),但最大弯矩位置基本没有改变。相比切割之前,切割环附近1环以内隧道有弯矩的突变,故整个切割过程对邻近隧道弯矩的影响范围在1环以内。

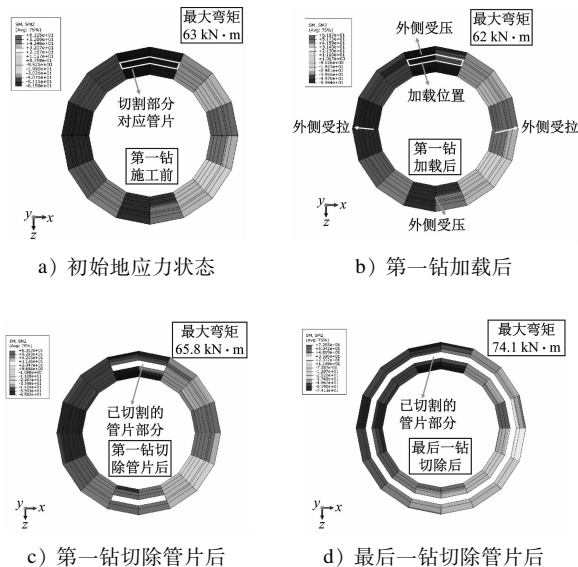


图7 隧道平面内弯矩云图

3.3 隧道环内轴力

图8分别为初始地应力状态下、第一钻加载后、第一钻切割完成后和最后一钻切割完成后的管片环内轴力分布情况。从图8a)和图8b)可以看出,第一钻加载后,对应切割部分附近有环内(块与块)轴力的突变,且最大轴力位置发生改变,突变影响范围在1环以内。从图8b)和图8c)可以看出,由于管片被第一钻切割以后,结构的整体性被破坏,该环的环内轴力重分布(轴力值降低),并转移给邻近的管片环,使邻近环轴力大幅提升(增幅约118%);直至完全切割完成,切断了轴力转移的路径,邻近环环内轴力才有小幅降低,如图8d)所示。切割期间,邻近环最大轴力位置基本未变,整个切割过程对邻近管片环内轴力的影响范围在1环以内。

3.4 隧道环间轴力

图9分别为初始地应力状态下、第一钻加载后、第一钻切割完成后和最后一钻切割完成后的隧道环间轴力分布情况。从图9a)和图9b)可以看出,第一钻加载后,由于扭转剪应力造成环间轴力的重分布,对应切割部分附近有环间(环与环)轴力的突变,最大轴力位置发生改变,突变影响范围在2环以内。从图9c)和图9d)可以看出,由于管片被第一钻切割以后,结构的纵向整体性被破坏,结构随切

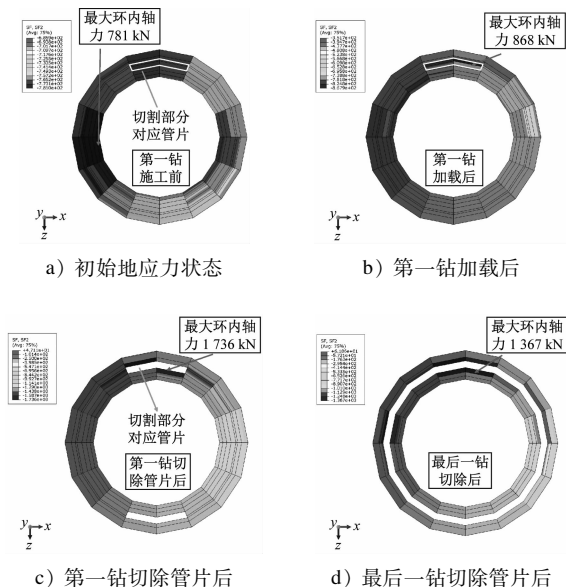


图8 隧道环内轴力云图

割逐渐失去纵向约束,环间轴力重分布,开始出现轴向拉力,直至整环切除,受保护侧较大范围出现受拉环间轴力,影响范围在2~3环。

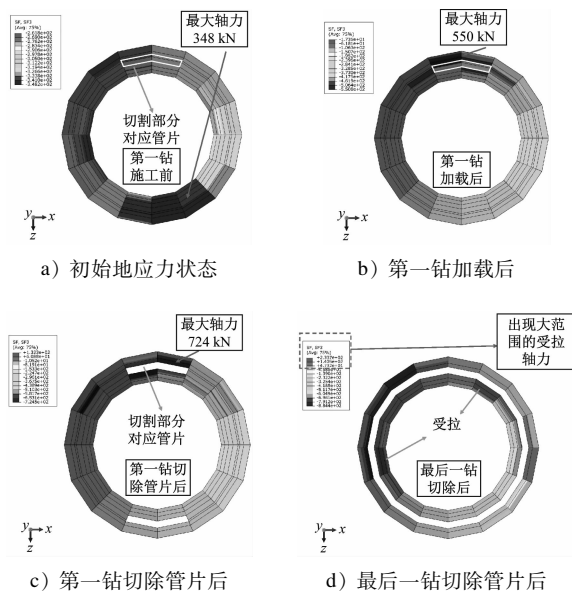


图9 隧道环间轴力云图

3.5 隧道环间剪力

图10分别为初始地应力状态下、第一钻加载后、第一钻切割完成后和最后一钻切割完成后的管片环间剪力分布情况。从图10a)和图10b)可以看出,设备压力造成环间剪力的重分布,第一钻加载后,对应切割部分附近有环间(环与环)剪力的突变,突变影响范围在1环以内。从图10c)和图10d)可以看出,由于管片被第一钻切割以后,结构的纵向整体性被破坏,结构随切

d)可以看出,由于管片被第一钻切割以后,结构的纵向整体性被破坏,对应切割部分附近有环间(环与环)剪力的突变,突变影响范围在1环以内。

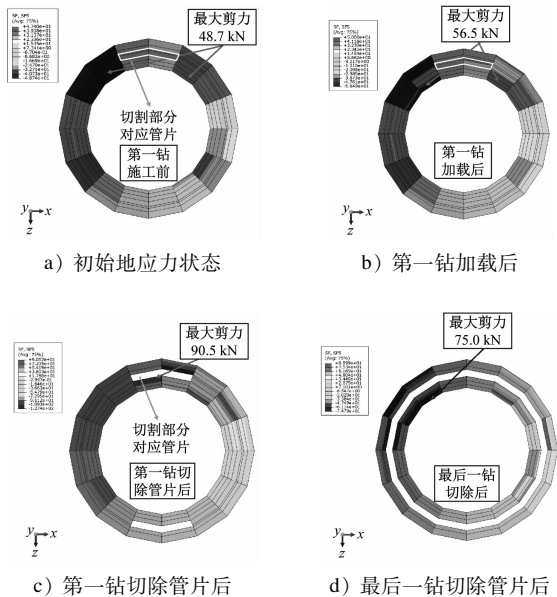


图10 隧道环间剪力云图

4 结论

本文利用有限元软件 ABAQUS 模拟了隧道修复段管片切割对邻近完好隧道管片的影响。模拟分析得到如下结论:

(1) 由于在切割前对隧道内一定长度范围进行了水泥砂浆的填充,水泥砂浆对隧道管片的变形起到了一定的抑制作用,所以隧道管片施工前后沿各个方向的位移变化并不明显,均为毫米级的变形,且均未超过 5 mm,满足规范要求。

(2) 钻机竖向荷载比原覆土荷载小,故对隧道的主要影响因素为钻机切割扭矩。管片切割后隧道衬砌结构的整体性降低,平面内最大弯矩出现小幅提高(增幅约 17%),最大弯矩位置基本没有改变,整个切割过程对邻近隧道弯矩的影响范围在 1 环以内。

(3) 第一钻加载后,对应切割部分附近有环内(块与块)轴力的突变,且最大轴力位置改变,突变影响范围在 1 环以内;由于管片被第一钻切割后,结构的整体性被破坏,该环的环内轴力重分布(降低),并转移给邻近的管片环,使其轴力大幅提升(增幅约 118%);直至完全切割完成,切断了轴力转

移的路径,邻近环内轴力才有小幅降低。切割期间最大轴力位置基本没有改变,整个切割过程对邻近管片环内轴力的影响范围在 1 环以内。

(4) 第一钻加载后,由于扭转剪应力造成环间轴力的重分布,对应切割部分附近有环间(环与环)轴力的突变,最大轴力位置发生改变,突变影响范围在 2 环以内;而在管片被第一钻切割以后,结构的纵向整体性被破坏,结构随切割逐渐失去纵向约束,环间轴力重分布,开始出现轴力拉力;直至整环切除,受保护侧较大范围出现受拉环间轴力,影响范围为 2~3 环。

(5) 设备竖向压力造成环间剪力的重分布,第一钻加载后,对应切割部分附近有环间(环与环)剪力的突变,突变影响范围在 1 环以内;在管片被第一钻切割以后,结构的纵向整体性被破坏,对应切割部分附近有环间(环与环)剪力的突变,突变影响范围在 1 环以内。

参考文献

- [1] 黄志斌,游杰. 软土地层地铁盾构区间锚索处理技术[J]. 城市轨道交通研究,2017(6):125.
- [2] 王昇,焦家训. 武汉长江深层隧道切割施工技术[J]. 南水北调与水利科技,2010(1):126.
- [3] 牛西伦. 全回转套管钻机切割管片施工技术[J]. 价值工程,2016(22):111.
- [4] 朱卫杰,余喧平,郭亮,等. 深层障碍物切割清理施工技术及其应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(4):676.
- [5] 司海宝,蔡正银. 基于 ABAQUS 建立土体本构模型库的研究[J]. 岩土力学,2011,32(2):599.
- [6] 孙吉主,高晖. ABAQUS 在软基固结过程分析中的应用[J]. 岩土力学,2007,28(增刊1):919-922.
- [7] 秦会来,张甲峰,郭院成,等. ABAQUS 在计算基坑开挖变形中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2012(增刊1):82.
- [8] HIBBITT, KARLSSON, SORESENSEN. Abaqus Version 6.5, User's Manual, Theory Manual [M]. Pawtucket: Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 2005.
- [9] CHAPMAN D N, HUNT D V L, AHN S K. Investigating ground movements caused by the construction of multiple tunnels in soft ground using laboratory model tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007,44(6):631.
- [10] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001,38(3):461.
- [11] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(1):11.

(收稿日期:2017-06-14)