

DOI: 10.11779/CJGE201806011

# 热力盾构隧道先盾后井施工衬砌接头变形机理与控制

姚文博<sup>1</sup>, 贺少辉<sup>\*1</sup>, 张嘉文<sup>1</sup>, 刘夏冰<sup>1</sup>, 郭炎伟<sup>2</sup>, 马 腾<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450052;  
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 先盾后井是热力盾构隧道建设中一种高效经济的施工工法。结合中国首例大断面热力盾构隧道工程, 基于纵向等效连续化模型和弹性地基梁理论, 对施工过程中衬砌接头受力特征和变形机理进行了分析, 并提出控制措施; 然后建立了衬砌接头全断面接触面单元数值模型, 对控制效果进行分析和评价; 最后通过现场监测, 得到了不同施工阶段管片纵向轴力及接缝变形规律。研究结果表明: 先盾后井工法施工中, 衬砌接头变形分为两个阶段: 基坑开挖及管片拆除, 其中管片拆除为接头变形的主因, 基坑施工中, 基底卸荷产生的负弯矩作用于隧道上, 导致邻近竖井管片底部轴力减小、环缝张开, 拆除基坑内管片时, 作用于端头管片的残余盾构推力和螺栓预紧力消失, 导致管片纵向轴力进一步衰减, 环缝二次张开; 根据现场监测结果, 提出的对邻近竖井的管片纵向拉紧并复紧连接螺栓, 进行混凝土铺底及衬砌背后二次注浆的控制措施能够有效控制轴力损失, 减小接头变形, 施工中环向接缝最大张开量 3.51 mm, 满足隧道防水要求; 采用全断面接触面单元建立的数值模型可以较为精确地模拟施工中管片接头力学行为, 其结果可作为控制效果评价参考依据。

**关键词:** 热力盾构隧道; 先盾后井; 管片拆除; 接头; 变形控制; 数值模拟; 接触面单元

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2018)06-1056-10

**作者简介:** 姚文博(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究。E-mail: yao\_wb@bjtu.edu.cn。

## Deformation mechanism and control technology of segment joints during process of shield tunneling prior to shaft excavation in a heat-supplying tunnel project

YAO Wen-bo<sup>1</sup>, HE Shao-hui<sup>1</sup>, ZHANG Jia-wen<sup>1</sup>, LIU Xia-bing<sup>1</sup>, GUO Yan-wei<sup>2</sup>, MA Teng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Henan Provincial Communications Planning &

Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an

710043, China)

**Abstract:** The shaft excavation following the shield tunnel is an efficient and economic method in the construction of heating shield tunnel. Based on the first large cross-section heating shield tunnel project, the stress characteristics and deformation mechanism of segment joints at different construction stages are analyzed using the longitudinal equivalent continuous model and the elastic foundation beam theory, and the control measures are proposed. The numerical model for the full face interface element is established, and the control effect of the measures is analyzed and appraised. Finally, the change laws of longitudinal stresses and segment joints at different construction stages are measured through field monitoring. The results indicate that the deformation of segment joints can be divided into two stages in the shaft excavation following the shield tunnel: foundation excavation and segment removal, and the segment removal is the main reason. The negative bending moment formed in the excavation of shaft affects the bottom segments of tunnel, and the disappearing of remnant shield force caused by segment removal enlarges the loss of longitudinal stress and opening of segment joints. According to the monitoring results, the control measures including longitudinal tension segment and retightening the bolt, pouring concrete in the tunnel bottom and secondary grouting behind the lining can effectively control the loss of longitudinal stress, and reduce the deformation of joints. The maximum opening of segment joints is 3.51 mm, meeting the waterproof requirements of tunnels. The numerical model based on the full face interface element can be used to simulate the mechanical behaviors of the segment joint in construction, and the results can be used as reference for evaluation of the control effects.

**Key words:** heat-supplying shield tunnel; shafts excavation

基金项目: 北京热力集团基金课题 (C14L01540)

收稿日期: 2017-03-27

\*通讯作者 (E-mail: heshaohui1114@163.com)



following shield tunnel; segment removal; segment joint; deformation control; numerical analysis; interface element

## 0 引言

目前, 盾构法以其安全、高效、适用性好等优点已经在城市地铁、电力、供水、通讯等工程建设中广泛应用, 并且积累了丰富的经验<sup>[1-3]</sup>, 将盾构法应用于热力隧道工程, 将大大推进城市热力管网的建设。国际上将盾构法应用到热力隧道的工程实例较少, 仅在哥本哈根修建有一条热力盾构隧道<sup>[4]</sup>, 隧道长 3.9 km, 最大埋深 38 m, 衬砌采用钢纤维混凝土管片, 外径 4.8 m, 内径 4.2 m, 沿线共设置了 3 个竖井。施工中按照传统工法, 先施工竖井, 之后盾构机从始发井出发, 在中间竖井进行一次接收始发后, 再继续掘进至终点接收井。由于盾构直径较小, 且竖井数量较少, 采用先井后盾具经济优势。近年来随着盾构技术大量应用, 在一些工程中由于受周边环境的限制, 竖井不能及时开挖, 因而出现了在盾构基础上进行扩挖的工法, 并成功应用于地铁车站的施工<sup>[5-7]</sup>。相较于地铁车站的扩挖施工, 热力盾构隧道先盾后井工法有其独特之处。首先, 盾构施工完成后, 在隧道正上方要进行竖井基坑的开挖, 施工中土体开挖卸荷将引起隧道上抬变形<sup>[8]</sup>; 其次, 竖井内的数十环盾构管片需全部拆除, 邻近竖井的端头管片将处于临空状态, 此时盾构管片之间残存的盾构推力不均匀释放会使接头产生变形, 在整个施工过程中如果变形过大, 将严重影响隧道结构的正常使用, 造成安全隐患<sup>[9]</sup>。

对于先盾后井工法, 国内有学者进行过相关的研究, 杨春山等<sup>[10-11]</sup>、黎国雄等<sup>[12]</sup>对先盾后井施工中环缝张开量的影响因素进行了研究, 主要认为基坑开挖导致盾构隧道整体上抬引起的管片张开, 其张开量受地下水、土层刚度及进出洞口局部加固的影响, 建议对邻近工作井 5 环管片长度范围内土体进行旋喷加固

处理。莫海鸿等<sup>[13]</sup>对先盾后井施工中工作井支护结构进行了优化, 提出了采用正交试验法得到合理的基坑支护方案, 通过科学合理的基坑支护体系来控制隧道结构的变形。以上研究主要针对基坑开挖阶段管片张开量的变化与控制, 并未考虑到管片拆除对衬砌接缝变形的影响。本文以中国首条大断面热力盾构隧道工程为背景, 对先盾后井施工中各施工阶段衬砌接头的受力特征及变形机理进行了分析, 提出了控制措施, 并对施工过程进行跟踪监测, 得到了不同施工阶段隧道衬砌接头的变化规律, 并由此得出一些有益的结论, 为今后热力盾构隧道先盾后井设计和施工提供了经验和指导。

## 1 先盾后井施工方案的确立及需解决的关键问题

### 1.1 工程概况

东北热电中心配套热网北线工程东坝中路—温榆河大道是中国首次采用盾构法施工的大断面热力隧道, 隧道全长 6.2 km, 分为东西两线。盾构起点位于首都机场第二通道东侧, 东线接收井位于温榆河大道, 全长 2749.4 m, 共设置检查井 8 个, 西线接收井位于东坝中路, 全长 3444 m, 共设置检查井 10 个, 检查井布置如图 1 所示, 图中数字序号代表检查井编号, 检查井工程地质及结构参数如图 2 所示。

盾构隧道衬砌外径 6000 mm, 内径 5400 mm, 衬砌环宽度 1200 mm, 厚度 300 mm, 衬砌环由 3 块标准管片 (A 型)、2 块邻接管片 (B1、B2 型), 1 块封顶管片 (C 型) 组成, 均采用钢筋混凝土制作; 纵、环向螺栓均采用 M24 高强螺栓, 环与环之间设 16 个



图 1 热力盾构隧道检查井布置图

Fig. 1 Layout of inspection wells of heating shield tunnel

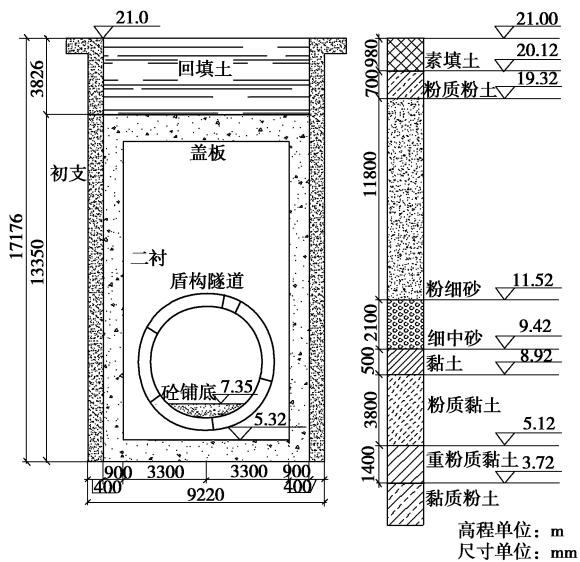


图2 检查井地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of examination room

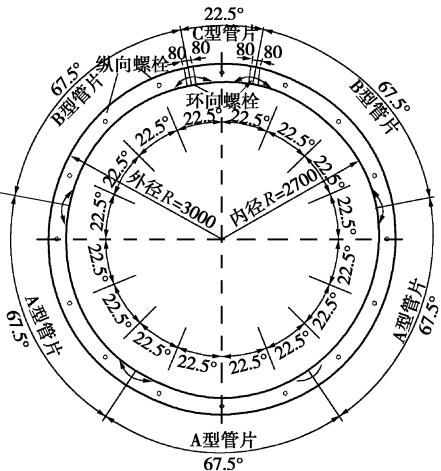


图3 隧道管片砌结构设计图

Fig. 3 Structural design of segment lining of tunnel

纵向连接螺栓，沿圆周均匀布置，同一环中相邻两块管片间环向连接设2个螺栓，每环共设12个环向螺栓，螺栓中心线距管片内侧边缘120 mm，如图3所示。隧道内设有供、回两根DN1400热力管道，全线共设固定支架18组，导向支架102组。

### 1.2 先盾后井施工方案的提出背景

根据施工方案，盾构隧道沿线共设置18个检查井，如按传统设计方案，采用先井后盾工法，由于竖井较多，各个竖井的施工工期不易控制，任何一个竖井出现工期拖延情况，都将影响盾构施工的进行；另外盾构机穿越竖井时，频繁进行始发与接收，需要大量辅助措施，工序复杂，且增加了工程造价。在充分借鉴国内外地铁施工中盾构先行再进行扩挖施工案例的基础上，提出了先盾后井的施工方案，即不开挖中间竖井，盾构机从始发井连续不停顿掘进至终点竖井，

然后再开挖中间竖井，完成检查井的施工。整个施工过程减少了盾构机进出竖井的次数，缩短了工期，降低了盾构机穿越的风险，但是增大了后续竖井施工的难度，并且要拆除已建好的盾构管片，不利于对衬砌接缝张开量的控制，施工中也出现了接缝变形及渗漏水的状况，如图4所示。



图4 接缝张开与错位导致渗漏水

Fig. 4 Joint opening and dislocation leading to leakage

### 1.3 先盾后井施工需解决的关键问题

对于先盾后井工法，由于施工中需要在已经建成的隧道上方进行基坑开挖并拆除竖井内数十环管片，如果施工处理不当，造成端头管片位移过大，引起较大的接缝张开或者错动，将对隧道防水产生严重影响。

采用先盾后井法施工并对竖井内管片拆除的主要施工步骤为：竖井开挖支护施工至管片外露4 m处，然后拆除中间一环管片上半圈（2B+C块），再对紧邻竖井的管片做内撑；之后拆除竖井内管片的上半圈（2B+C块），最后拆除竖井内下半圈（3A块），完成竖井施工。

从上述施工步骤可以看出，为了不影响隧道结构正常使用，采用先盾后井法进行检查井施工的两个关键控制点：

(1) 基坑开挖导致的隧道上抬变形。

(2) 管片拆除导致邻近竖井管片的盾构残余推力不均匀释放。

施工过程中，衬砌接头受力不断发生变化。在竖井施工中，基坑开挖导致隧道产生纵向变形，隧道受到负弯矩作用，引起底部接缝的张开变形，而顶部管片受压闭合；随后对竖井内数十环管片进行分部拆除，当拆除上半环管片时，上半环管片盾构残余推力的释放引起了顶部接缝张开变形；拆除剩余管片后邻近竖井的端头管片一侧完全处于临空状态，盾构残余推力消失导致接缝的二次张开，整个施工过程对接缝变形的控制尤为关键。

## 2 接头受力特征及控制措施

### 2.1 基坑施工过程衬砌接头受力特征

基坑开挖卸荷导致下卧盾构隧道产生上抬变形。在隧道隆起过程中, 位于基坑边缘的管片受到负弯矩作用。基于纵向等效连续化模型和弹性地基梁理论, 建立盾构隧道纵向分析模型, 计算此阶段接头受力及变形情况。

根据日本学者志波由纪夫<sup>[14-15]</sup>提出的纵向等效连续化模型, 隧道横向为一均质圆环, 在纵向上以刚度等效的方法把接头和管片等效为具有相同刚度特性的均质连续梁, 纵向等效刚度为<sup>[14-16]</sup>

$$EI = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos \varphi + \left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \sin \varphi} E_c I_c, \quad (1)$$

$$\cos \varphi + \varphi = \pi \left( \frac{1}{2} + \frac{k_{jl}}{E_c A_c / l_s} \right). \quad (2)$$

基于等效刚度求得受拉环缝最大张开量为<sup>[10]</sup>

$$\delta_1 = \frac{M l_s}{E_c I_c} \frac{\pi \sin \varphi}{\cos^3 \varphi} \frac{D}{2} (1 + \sin \varphi). \quad (3)$$

式(1)~(3)中  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $A_c$  为管片横截面积;  $I_c$  为隧道管片横截面惯性矩;  $D$  为隧道平均直径;  $l_s$  为管片环宽;  $k_{jl}$  为接头螺栓的线刚度;  $\varphi$  为管片受弯中性轴的位置角度;  $M$  为隧道纵向所受弯矩。表 1 衬砌管片设计参数: 外径  $D_1=6.0$  m, 内径  $D_0=5.4$  m, 环宽  $l_s=1.2$  m, 管片弹模  $E_c=34.5$  GPa, 螺栓直径  $d=24$  mm, 螺栓长度  $l=400$  m, 螺栓个数=16, 螺栓弹模  $E_l=206$  GPa。

将衬砌管片各个计算参数代入式(2), 求得中性轴位置角度为  $\varphi=1.402$ , 欲求得环缝张开量, 还需知道隧道所受最大弯矩。

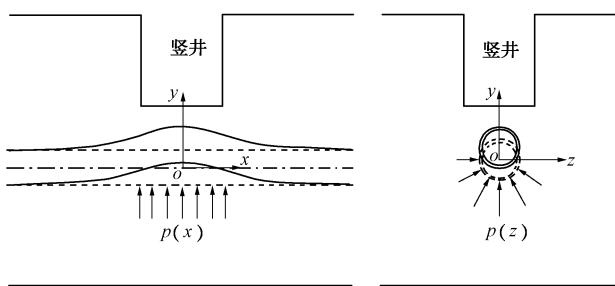


图 5 坚井开挖时隧道受力状态

Fig. 5 Stress states of tunnel at shaft excavation

对于基坑施工过程中隧道所受弯矩, 采用基于 Winkler 地基梁模型, 将隧道视为弹性地基上的无限长梁<sup>[16-17]</sup>, 建立图 5 所示坐标, 竖向位移、荷载与弯矩表达式为

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} + 4\lambda W(x) = \frac{P(x)}{EI}. \quad (4)$$

式中  $EI$  为隧道的等效刚度;  $\lambda = \sqrt[4]{K/4EI}$ ,  $K = kD_1$ ,  $k$  为地基基床系数,  $D_1$  为隧道外径;  $W(x)$  为隧道的竖向位移;  $P(x) = \sigma_z D_1$ ,  $\sigma_z$  土体附加应力。

式(4)在集中荷载  $p_0$  下的解答为

$$W(x) = \frac{p_0 \lambda}{2K} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x). \quad (5)$$

对  $W_z(x)$  取 2 阶导数, 得到隧道纵向弯矩的表达式为

$$M(x) = \frac{p_0}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x). \quad (6)$$

检查井长 12 m, 因此作用于邻近竖井首环管片的弯矩为

$$M = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{p_x}{4\lambda} e^{-6\lambda} (\cos 6\lambda - \sin 6\lambda) d_x, \quad (7)$$

式中,  $L$  为基坑长度。坑底面土体竖向卸荷相当于对基坑底面施加竖直向上的大小为  $\sigma_z = \gamma_s d_s$  ( $\gamma_s$  为开挖土层重度加权值,  $d_s$  为开挖深度) 的分布荷载, 根据地勘报告, 隧道埋深 9 m, 分层总和计算所得  $\sigma_z = 81.5$  kPa; 基床系数  $k$  取 20 MPa/m, 计算得  $\lambda = 0.12$ ; 将上述计算参数代入式(7)求得竖井基坑边缘隧道所受弯矩为 4016 kN·m, 再代入式(3)求得基坑开挖中环缝最大张开量为 2.36 mm。

根据隧道结构的临界状态分类<sup>[18]</sup>: 管片抵抗 0.5 MPa 水压的环缝容许张开量为 2 mm, 保证环缝密封不漏水的极限张开量为 6 mm。上述计算结果表明, 基坑开挖阶段产生的环缝最大张开量为 2.36 mm, 在承受 0.5 MPa 水压下, 隧道将有可能出现渗漏水。因而在基坑施工阶段应加强对底部接缝的监测与控制。

## 2.2 管片拆除过程衬砌接头受力特征

管片环缝先是在盾构推力及螺栓预紧作用下闭合, 随后拆除管片, 卸除管片之间的残余盾构推力, 管片再次张开。假设残余盾构推力为  $N$ , 管片拆除后残余盾构推力释放, 在弹性阶段, 可将此部分力视为作用于隧道上的拉应力, 如图 6 所示。

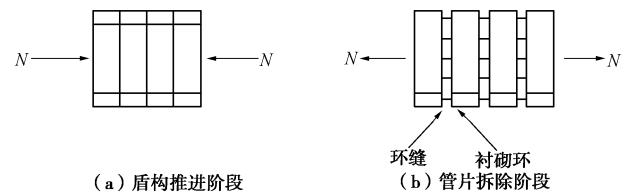


图 6 隧道纵向受力变形示意图

Fig. 6 Schematic diagram of longitudinal deformation of tunnel segments

与志波模型相同, 假定螺栓沿衬砌环均匀分布, 此时环缝张开量为

$$\delta_2 = \frac{N}{n E_l A_l / l}, \quad (8)$$

式中,  $E_l$  为接头螺栓弹性模量,  $A_l$  为接头螺栓截面积,  $l$  为接头螺栓长度,  $n$  为接头螺栓数量。

本次热力盾构工程, 盾构总推力设计值为 40000

kN, 根据现场监测的数据, 管片最大轴力为 4.57 MPa, 由此推断管片间盾构残余推力在 24540 kN 左右, 将其代入式 (8), 可得邻近竖井首环管片环缝张开量为 6.58 mm。考虑到基坑开挖阶段后, 环缝最大张开量为 8.94 mm, 此时的环缝张开量过大, 超过了保证环缝密封垫不漏水的极限张开量, 如不采取补救措施, 隧道很可能发生渗漏事故。

### 2.3 接头变形控制措施

理论计算结果表明: 先盾后井施工中, 如果不采取保护措施, 环向接缝张开量将超出 6 mm 的极限张开量。为保证接缝变形在容许的范围以内, 对隧道结构采取以下保护措施:

(1) 在竖井施工前, 将邻近竖井的 6 环管片利用型钢进行纵向拉紧, 并复紧连接螺栓以增加隧道的整体性。型钢主要布置在隧道腰部, 左右各两根, 采用焊接方式进行固定 (如图 7 所示), 在施工过程中预先拉紧的型钢可将盾构残余推力释放的荷载传递至后方管片中, 避免邻近竖井的首环管片出现较大的接缝张开。

(2) 优化管片的拆除方案, 在拆除竖井内管片的上半圈 (2B+C 块) 后进行混凝土铺底施工, 再拆除下半环管片。热力盾构隧道底部需进行混凝土铺底以架设管道, 为了最大限度减少接缝的变形, 在拆除上半圈管片后, 为混凝土铺底创造了条件, 此时先进行混凝土铺底, 待达到一定强度后再进行下半环管片的拆除, 既能保证施工进度, 又能控制接缝的变形量。

(3) 竖井开挖前对管片背后进行二次注浆。盾构隧道的二次注浆可以弥补同步注浆未填充区域以及体积减少的部分, 减轻隧道的防水压力, 提高止水效果; 同时, 增加管片与注浆层之间的摩擦, 减小管片位移及接缝张开。



图 7 利用型钢纵向拉紧衬砌

Fig. 7 Longitudinal tension lining

### 3 先盾后井施工接头变形数值模拟

为对先盾后井施工接头变形控制措施及效果更好的分析和评价, 本文采用 FLAC<sup>3D</sup> 三维有限差分程序建立了管片接头全断面接触单元模型<sup>[6]</sup>。

#### 3.1 计算模型及参数

计算模型以工程实例为基础, 选取典型地层, 其物理力学参数见表 1, 岩土本构关系采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 模型尺寸 72 m (X 方向)  $\times$  45 m (Y 方向)  $\times$  60 m (Z 方向), 如图 8 所示, 先盾后井施工中, 衬砌接头的变形以环向接缝的张开为主, 在模型中, 假定管片环为均质环, 考虑环缝与环间螺栓的作用, 即在管片环向接头处建立全断面接触面单元 (见图 9), 梁单元模拟纵向连接螺栓, 预紧力施加在梁单元节点上<sup>[19]</sup> (见图 10); 同时, 采用等效注浆层模拟盾尾同步注浆效果, 在注浆层与管片之间建立接触面单元来模拟注浆层与衬砌的接缝; 盾构管片、竖井支护采用弹性三维实体单元模拟, 竖井内支撑和拉紧管片的型钢采用梁单元模拟。隧道管片及竖井支护结构参数见表 2, FLAC<sup>3D</sup> 手册推荐接触面的法向刚度和切向刚度 10 倍于周边“最硬”单元体的等效刚度<sup>[20]</sup>。

$$k_n = k_s = 10 \max \left\{ \frac{K + 4/3G}{Z_{\min}} \right\}, \quad (9)$$

式中,  $k_n$  为法向刚度,  $k_s$  为切向刚度,  $K$  为单元体体积模量,  $G$  为单元体剪切模量,  $Z_{\min}$  为接触面法向方向单元最小尺寸。利用式 (9) 计算得到接触面参数见表 3。

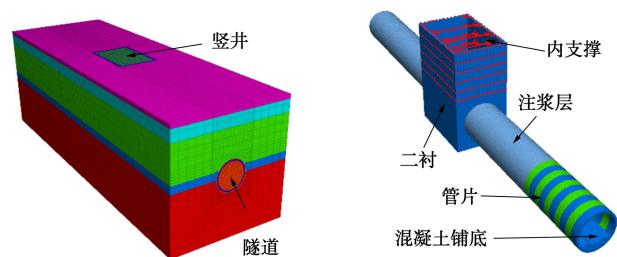


图 8 数值计算模型网格

Fig. 8 Grid of numerical model



图 9 环缝接触面与注浆缝接触面

Fig. 9 Interface between segment joint and grouting joint

盾构掘进的施工过程按照实际的施工工序, 根据土压平衡盾构原理, 在盾构开挖面上施加梯形应力, 以平衡开挖面水土压力; 通过对管片施加水平应力以模拟千斤顶对管片的推力; 在模拟过程中, 土仓压力、注浆压力及盾构推力均基于该工程的实际情况取值, 盾构推力为 40000 kN, 注浆压力为 0.25 MPa。

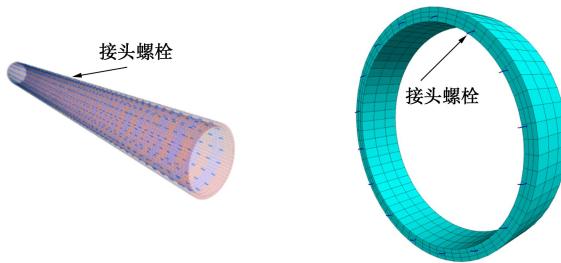


图 10 模型中的接头螺栓

Fig. 10 Model of joint bolt

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层材料	土层厚度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比
素填土	2.0	1850	8	10.0	4.5	0.32
粉质粉土	2.6	1870	33	15.5	7.2	0.30
粉细砂	11.8	1950	0	30.0	25.5	0.28
细中砂	1.8	1870	0	35.0	30.5	0.28
粉质黏土	26.8	1950	49	24.0	10.2	0.31

表 2 结构单元计算参数

Table 2 Calculation parameters of structural elements

名称	材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
盾构管片	C50 钢筋混凝土	2500	34.50	0.2
竖井二衬	C40 钢筋混凝土	2500	32.50	0.2
竖井初支	C20 喷射混凝土	2300	25.50	0.2
支撑体系	型钢	7860	206.00	0.3
连接螺栓	5.8 级 M24 螺栓	7860	206.00	0.3
注浆层	浆液	2000	0.07	0.3

表 3 接触面单元计算参数

Table 3 Calculation parameters of interface

名称	法向刚度/(GPa·m <sup>-1</sup> )	切向刚度/(GPa·m <sup>-1</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
环向接缝接触面	5.5	5.5	20	10
同步注浆接触面	0.4	0.4	200	20
二次注浆接触面	0.8	0.8	400	40

### 3.2 计算结果及分析

通过分析管片环向接头接触面单元的法向位移, 可以得到各施工阶段环向接缝的张开量。本文对采取控制措施前后的工况分别进行了模拟, 邻近竖井的首环管片及环缝张开在不同施工阶段计算结果如图 11 所示。

从数值模拟结果来看, 在未采取保护措施时, 隧

道顶部环缝最大张开量为 6.46 mm, 与理论计算结果 6.58 mm 接近; 但是底部环缝张开量为 5.33 mm, 与理论计算结果相差较大, 原因是数值模拟考虑了管片与注浆圈之间的摩擦作用, 受摩擦影响底部环缝张开量要小于理论计算结果。

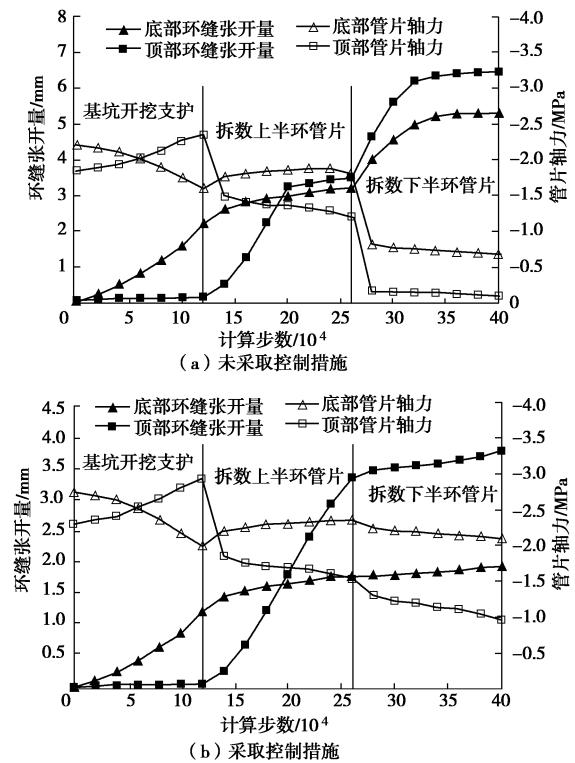


图 11 不同施工阶段环缝张开量及管片纵向轴力变化

Fig. 11 Calculated values of longitudinal stress and opening of segment joint

在采取了保护措施以后, 计算所得顶部环缝最大张开量为 3.75 mm, 底部环缝最大张开量为 1.95 mm, 其环缝张开量均控制在 6 mm 以内; 同时邻近竖井的首环管片盾构残余轴力并未完全消失, 隧道顶部残余轴力为 0.98 MPa, 隧道底部残余轴力为 2.11 MPa, 由此可见在对邻近竖井的 6 环管片利用型钢进行纵向拉紧后, 有效的控制了环缝的张开及管片纵向轴力损失。在拆除下半环管片后, 环缝张开量及残余盾构推力并未出现急剧变化, 可见拆除底部管片之前先进行混凝土铺底有良好的控制效果。

在采取了接头变形控制措施后, 邻近竖井的 20 环管片纵向轴力与环缝张开量计算值如图 12 所示。以保证环缝密封垫不漏水的极限张开量 6 mm 为标准, 在采取了接缝张开的控制措施后均达到了控制标准; 但是邻近竖井的前 6 环管片顶部环缝张开量超过了 2 mm, 在 0.5 MPa 水压下, 接缝将有可能出现渗漏, 因而在实际施工中, 还需加强对接头受力状态及变形的监测。

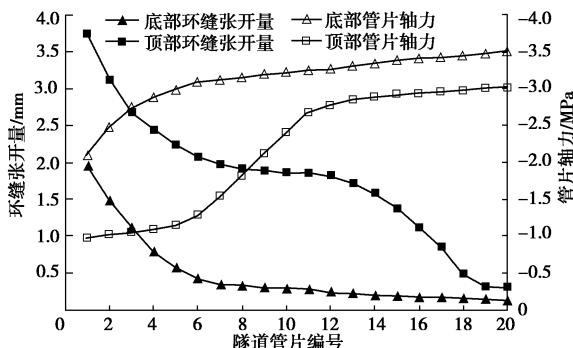


图 12 环向接缝张开量及管片纵向轴力计算值

Fig. 12 Calculated values of longitudinal stress and opening of segment joint

## 4 接头变形监测成果分析

### 4.1 监测方案

东线#18 检查井位于坝河附近（见图 1），地质调查报告显示坝河现状河底标高 17.75 m，根据估算，河底距离衬砌顶部在 6 m 范围内。此段如果出现环缝张开过大的情况，在汛期，管片承受高水压的情况下极易出现渗漏，因此选取#18 检查井作为监测对象，在竖井一侧的 1, 9, 20 环管片中布置了 XJH-2 型埋入式混凝土应变计，量程 1000  $\mu\epsilon$ ，分辨率 0.2%F.S. (2  $\mu\epsilon$ )，并在竖井同侧的 1, 9, 20 环缝间安装了 XJW-2 (B) 型振弦式测缝计，量程 10 mm，分辨率 0.1%F.S. (0.01 mm)。监测仪器布置如图 13 所示。

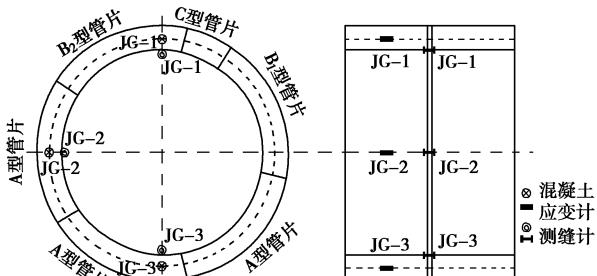
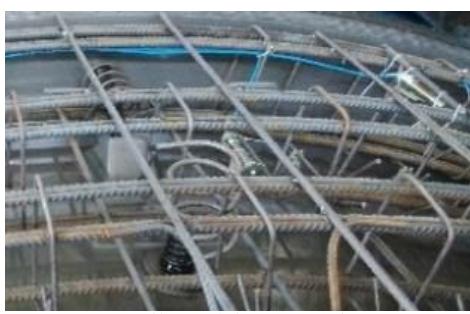


图 13 监测仪器布置图

Fig. 13 Layout of monitoring instruments

管片制作过程中，将混凝土应变计安装于预定的管片及相应位置处；盾构施工完成，竖井施工前在预定的环缝监测处安装测缝计（图 14）。仪器安装完毕后，使用频率仪读取初始值，混凝土应变计初始值取自管片现场拼装前，测缝计初始值取自现场安装完成后。



(a) 管片厂安装混凝土应变计



(b) 现场安装测缝计

图 14 安装完成监测仪器

Fig. 14 Installation of monitoring instruments

### 4.2 监测结果分析

根据监测结果，绘制了环缝张开量及隧道管片纵向轴力监测时程曲线（图 15, 16），在混凝土铺底后，测缝计被掩埋，停止隧道底部环缝张开量监测。从监测结果可以得出以下结论：

(1) 直接引起环缝张开及轴力衰减的因素有两个：竖井基坑的开挖和盾构管片的拆除，其中以管片拆除为主因。在不同的施工阶段，环缝的张开量呈现出不同的变化趋势。

从#1 环缝张开量的变化曲线可以看出，竖井基坑开挖支护阶段，隧道底部环缝张开量逐渐增大，最大张开量为 1.44 mm，而顶部管片环缝几乎未见张开。拆除竖井内上半环管片后，隧道顶部环缝张开量迅速增加，最大张开量 3.34 mm，进行混凝土铺底后，其增加趋势逐渐减缓，最终稳定在 3.51 mm；隧道底部环缝张开量在拆除管片后未见明显增大，而是趋于平稳，其最大张开量为 1.69 mm。从环缝的最终张开量来看，顶部环缝张开量要大于底部。

(2) 隧道施工完成后，管片之间仍然存在轴向应力。从#1 管片纵向轴力监测结果来看，在基坑开挖支护阶段，管片顶部轴力逐渐增大，底部轴力却逐渐减小；而在拆除上半环管片后，顶部轴力突然变小，端头管片纵向轴力减小到 1.91 MPa，变化量为 32%，同时底部轴力略有增大，端头管片底部轴力增加到 2.34 MPa，变化量为 16%。从管片纵向轴力的最终变化量来看，#1 管片顶部的轴力衰减最大，施工前后轴力减小了 1.16 MPa，衰减率为 49.6%。

(3) 从#9 环缝张开量变化曲线结果来看，在基坑开挖阶段，环缝张开量变化很小，最大张开量仅为 0.30 mm，位于隧道底部，但是在进行管片拆除后，隧道顶部环缝迅速变化，最大张开量为 1.87 mm，所以基坑开挖对管片环缝张开的影响在 9 环之内，而管片拆除对环缝张开的影响更大；从#20 环缝张开量监测曲线中可以看出，整个施工过程中，环缝张开量并

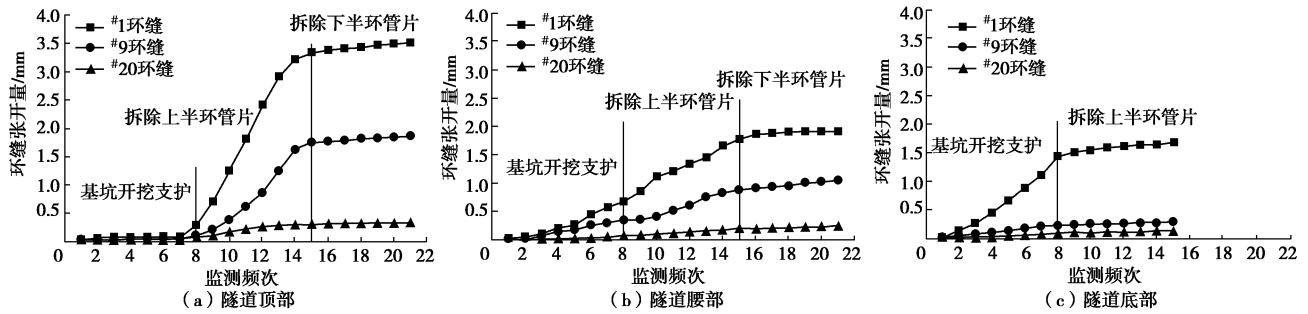


图 15 环缝张开量监测曲线

Fig. 15 Monitoring curves of opening of segment joint

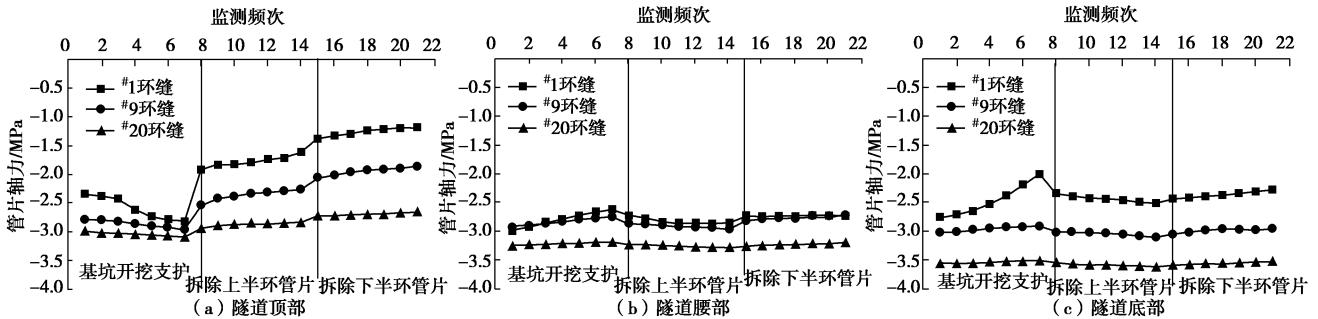


图 16 管片纵向轴力监测曲线

Fig. 16 Monitoring curves of longitudinal stress

未出现较大变化, 最大张开量为 0.34 mm, 且位于隧道顶部, 可见管片拆除对环缝张开量的影响在 20 环范围以内。

(4) 从<sup>#9</sup>管片纵向轴力监测结果看, 基坑开挖阶段, 管片纵向轴力变化较小, 在基坑开挖完成后, 拆除上半环管片前, 顶部轴力变化量为 6%, 底部轴力变化量仅为 3%, 均在 10% 以内, 可见基坑开挖对管片纵向轴力的影响在 9 环范围以内。在<sup>#20</sup>管片纵向轴力监测曲线中, 管片纵向轴力并未出现较大变化, 可见管片拆除对轴力的影响也在 20 环范围以内。

#### 4.3 数值模拟及监测结果对比分析

数值模拟与实测值对比如表 4 所示。采用全断面接触面单元建立的数值模型计算所得环缝最大张开量为 3.75 mm, 位于隧道顶部; 现场监测环缝最大张开量为 3.51 mm, 同样位于隧道顶部, 同时, 在拆除管片之后, 管片之间的残余盾构推力并未完全消失, 邻近竖井首环管片顶部残余轴力为 1.18 MPa, 衰减率为 49.6%, 隧道底部残余轴力为 2.28 MPa, 衰减率为 17.4%, 与数值计算的结果基本吻合, 可见采用全断面接触面单元建立的数值模型结果合理可靠。

如 1.3 节所述, 针对热力盾构隧道检查井数量较多的特殊工况, 采用先盾后井工法最为担心的问题就是接头变形过大导致渗漏水。通过本次工程实践, 结合理论及数值模拟方法提出并分析了一系列接头变形

控制措施, 根据现场接缝受力及变形监测结果, 验证了先盾后井工法的可行性, 为今后盾构法应用于热力隧道建设提供了技术支撑。

表 4 计算值与实测值的结果对比

Table 4 Comparison between calculated and measured values

管片 编号	位置	环缝张开量		管片纵向轴力	
		监测值 /mm	计算值 /mm	监测值 /MPa	计算值 /MPa
1	顶部	3.51	3.75	-1.18	-0.98
	底部	1.69	1.95	-2.28	-2.11
9	顶部	1.87	1.89	-1.86	-2.12
	底部	0.30	0.30	-2.96	-3.11
20	顶部	0.34	0.31	-2.65	-3.02
	底部	0.14	0.12	-3.53	-3.51

## 5 结 论

基于理论分析提出了先盾后井接头变形控制措施, 采用全断面接触面单元数值计算模型对控制效果进行了分析和评价, 并进行了现场跟踪监测, 得到了先盾后井施工中接头变形及受力特征, 主要结论如下:

(1) 热力盾构隧道检查井施工过程中, 衬砌接头变形分为两个阶段: 基坑开挖及管片拆除, 其中管片拆除为接头变形的主因。基坑开挖阶段, 基底卸荷产生的负弯矩作用于隧道上, 导致邻近竖井管片底部轴

力减小, 环向接缝张开; 在管片拆除阶段, 邻近竖井管片一侧临空, 盾构千斤顶残余盾构推力不均匀释放, 隧道顶部轴力衰减并导致环向接缝二次张开。

(2) 本文提出的接头变形控制措施: 将邻近竖井的管片纵向拉紧并复紧连接螺栓, 进行混凝土铺底, 对衬砌背后二次注浆等能够有效控制轴力损失, 减小接头变形, 施工中环向接缝最大张开量为 3.51 mm, 满足隧道防水要求。

(3) 采用全断面接触面单元建立的数值计算模型可以较为精确地模拟施工中管片接头力学行为, 其结果可作为控制效果评价参考依据。

## 参考文献:

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 21 - 22. (ZHOU Wen-bo. Shield tunneling technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 21 - 22. (in Chinese))
- [2] 张新金, 刘维宁, 路美丽, 等. 北京地铁盾构法施工问题及解决方案[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 93 - 99. (ZHANG Xin-jin, LIU Wei-ning, LU Mei-li, et al. Problem and solutions of shield tunnel for Beijing metro[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 93 - 99. (in Chinese))
- [3] 乐贵平, 贺少辉, 罗富荣. 北京地铁盾构隧道技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (LE Gui-ping, HE Shao-hui, LUO Fu-rong. Beijing subway shield tunneling technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [4] THOMAS Kasper, CAROLA Edvardsen, GERT Wittneben, et al. Lining design for the district heating tunnel in copenhagen with steel fiber reinforced concrete segments[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(5): 574 - 587.
- [5] 张新金. 盾构法与浅埋暗挖法结合建造地铁车站关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. (ZHANG Xin-jin. Study on key technologies of the metro station constructed by shield tunneling method combined with mining method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [6] 王 芳, 汪 挺, 贺少辉, 等. PBA 法扩挖大直径盾构隧道修建地铁车站时结构关键节点的受力分析[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(05): 54 - 62. (WANG Fang, WANG Ting, HE Shao-hui, et al. Mechanical behavior of critical joints in enlarging large diameter shield tunnel by PBA method to build metro station[J]. China Railway Science, 2013, 34(05): 54 - 62. (in Chinese))
- [7] 李兆平, 汪 挺, 郑 昊. 基于大直径盾构隧道扩挖地铁车站关键工况控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1869 - 1876. (LI Zhao-ping, WANG Ting, ZHENG Hao. Controlling measurements for metro station construction on enlarging large diameter shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1869 - 1876. (in Chinese))
- [8] 周泽林, 陈寿根, 陈 亮, 等. 基坑施工对下卧地铁隧道上抬变形影响的简化理论分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2224 - 2235. (ZHOU Ze-lin, CHEN Shou-gen, CHEN Liang, et al. Analysis of uplift deflection of subway tunnel due to adjacent pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2224 - 2235. (in Chinese))
- [9] 刘 印, 张冬梅, 黄宏伟. 盾构隧道局部长期渗水对隧道变形及地表沉降的影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 290 - 298, 304. (LIU Yin, ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Influence of long-term partial drainage of shield tunnel on tunnel deformation and surface settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 290 - 298, 304. (in Chinese))
- [10] 杨春山, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 盾构隧道先隧后井施工法对管片张开量的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 2870 - 2877. (YANG Chun-shan, MO Hai-hong, CHEN Jun-sheng, et al. Study the influence on segment opening of shield tunneling by tunnels followed by well excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2870 - 2877. (in Chinese))
- [11] 杨春山. 盾构隧道先隧后井施工对隧道变形的影响及对策研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2015. (YANG Chun-shan. Influence of shield tunnel construction on tunnel deformation and countermeasures[D]. Guangdong: South China University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [12] 黎国雄, 杨春山. 盾构隧道先隧后井施工技术特点分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2014, 27(3): 75 - 80. (LI Guo-xiong, YANG Chun-shan. Characteristics analysis of tunnel first well after construction method for shield tunnel[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2014, 27(3): 75 - 80. (in Chinese))
- [13] 莫海鸿, 杨春山, 陈俊生, 等. 盾构隧道先隧后井施工中工作井支护结构优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1346 - 1352. (MO Hai-hong, YANG Chun-shan, CHEN Jun-sheng, et al. Supporting optimization of working well in shield construction with tunnel followed by well

- excavation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(4): 1346 – 1352. (in Chinese))
- [14] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己. 応答変位法によるシールドトソネルの地震時断面力の算定法[C]// 土木学会論文集. 东京, 1989: 385 – 394. (YUKIS Shiba, KAZUHIKO Kawashima, NAOMI Obinata. Calculation of internal force of structure during earthquake using response displacement method[C]// Proceedings of the Civil Academy. Tokyo, 1989: 385 – 394. (in Japanese))
- [15] 志波由纪夫, 川島一彦. シールドトソネルの耐震解析に用いる長手方向覆土剛性の評価法[C]// 土木学会論文集. 东京, 1988: 319 – 327. (YUKIS Shiba, KAZUHIKO Kawashima. The evaluation of the duct's longitudinal rigidity in the seismic analysis of shield tunnel[C]// Proceedings of the Civil Academy. Tokyo, 1988: 319 – 327. (in Japanese))
- [16] 郑永来, 韩文星, 童琪华, 等. 软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(24): 4552 – 4558. (ZHENG Yong-lai, HAN Wen-xing, TONG Qi-hua, et al. Study on longitudinal crack of shield tunnel segment joint due to asymmetric settlement in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(24): 4552 – 4558. (in Chinese))
- [17] 黄栩, 黄宏伟, 张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1241 – 1249. (HUANG Xu, HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-mei. Longitudinal deflection of existing shield tunnels due to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1241 – 1249. (in Chinese))
- [18] 李翔宇, 刘国彬, 杨潇, 等. 基于修正纵向等效连续化模型的隧道变形受力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 662 – 670. (LI Xiang-yu, LIU Guo-bin, YANG Xiao, et al. Deformation and stress of tunnel structures based on modified longitudinal equivalent continuous model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 662 – 670. (in Chinese))
- [19] 钟小春, 张金荣, 秦建设, 等. 盾构隧道纵向等效弯曲刚度的简化计算模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 132 – 136. (ZHONG Xiao-chun, ZHANG Jin-rong, QIN Jian-she, et al. Simplified calculation model for longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel and its influence factors' analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 132 – 136. (in Chinese))
- [20] Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup> users manuals[M]. Version 2.1 Minneapolis: Minnesota, 2002.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhrri.cn。

(本刊编辑部)