

盾构隧道先隧后井施工技术特点分析

黎国雄¹, 杨春山²

(1. 广东省重工建筑设计院有限公司, 广州 510034; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640)

摘要:为了明确盾构隧道先隧道施工后工作井开挖(先隧后井)施工法特点,以典型工程实例为依托,通过现场实测与有限元法,分析了该施工法接收井与隧道的变形特性,计算分析了盾构管片张开量的分布规律。结果表明:隧道入接收井时洞内外产生较大的水土压力差,引起与隧道连接处局部围护墙水平位移增大及坑外水位下降。受后续基坑开挖影响,近基坑侧 6 环管片竖向位移显著增大,近基坑侧 4 环管片接头处出现了塑性变形,施工中隧道防渗分析可着重考虑近接收井 6 环管片范围。基于安全考虑,建议对近基坑侧 6 环管片范围土体进行加固处理。

关键词:盾构隧道;变形特性;张开量;实测分析;有限元法;先隧后井

中图分类号:U45

文献标志码:A

引言

近几年,盾构隧道施工中,先隧后井施工法以其开挖速度快,无需频繁进出洞,风险小等优点在盾构进洞施工中得到了广泛的应用,如广州地铁六号线东山口站、五号线五羊邨站及广州西江引水工程等均采用该施工法。较常规的先接收井施工后隧道开挖施工法(先井后隧),先隧后井施工技术更不成熟,因而实际施工中事故时有发生,如局部管片渗漏水、泥水涌入等病害,引起了许多专家学者的重视,并对相关问题展开了研究。杨春山等^[1-3]通过有限元法进行了盾构进洞方案比选,通过数值计算与理论推导得到了先隧后井施工中隧道纵向变形规律。魏新江等^[4]对盾构出洞口涌水、涌砂灾害问题作了分析,建立了地下水绕加固土体下卧层及井壁间隙渗流计算模型。赵峻与戴海蛟^[5]阐述了盾构隧道施工进出洞的重要性,分析了盾构进出洞施工中易发生的主要事故,同时提出了相应的预防措施。当前,洞口加固与防治范围仍以经验为主,缺乏合理依据,有效分

析不同施工法特点,合理判断不同施工法对盾构隧道影响规律显得至关重要。基于此,以典型工程为依托,借助现场实测及有限元法,得到了盾构隧道先隧后井施工中结构变形与管片张开量分布特点,确定了合理的加固范围,使现场施工加固有的放矢,也为类似工程施工积累经验。

1 工程概况

广州某盾构隧道接收井为一个长方形基坑,净空平面长度为 32 m,宽度为 14 m,基坑深为 22 m。基坑支护采用 1 m 厚地下连续墙加 4 道钢筋混凝土内撑。其中钢筋混凝土墙深度约 32 m,接收井剖面图如图 1 所示。盾构隧道施工工序为:开挖接收井基坑至第一道支撑处(开挖至 1 m)→浇筑第一道钢筋砼支撑→开挖接收井基坑至第二道支撑处(开挖至 6.5 m)→浇筑第二道钢筋砼支撑→盾构隧道施工至接收井,破除玻璃纤维筋进入接收井→开挖接收井基坑至第三道支撑处(开挖至 11.5 m)→浇筑第三道钢筋砼支撑→开挖接收井基坑

收稿日期:2014-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108190)

作者简介:黎国雄(1979-),男,广东佛山人,工程师,主要从事地下结构设计方面的研究,(E-mail)284229115@qq.com

至第四道支撑处(开挖至16.5m)→浇筑第四道钢筋砼支撑→开挖接收井基坑至坑底。场地土层物理力学参数见表1。

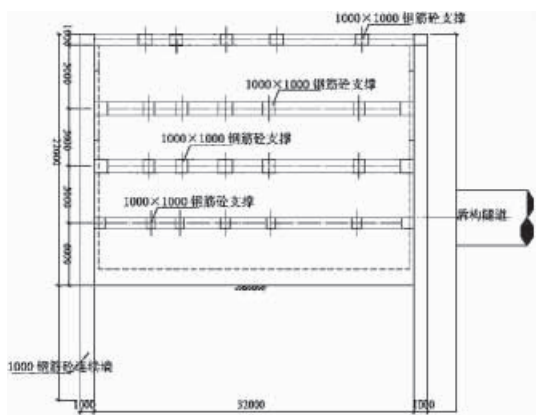


图1 接收井基坑支护体系剖面图

表1 土层物理力学参数

岩土分层	岩土名称	密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	固结快剪		压缩模量 /MPa
			黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	
①	人工堆填土	1.90	10.00	18.0	4.7
③ ₁	粉质黏土	1.99	19.20	15.2	5.86
③ ₃	含泥粉细砂	2.00	5.00	25.0	5.93
③ ₄	含泥中细砂	2.01	0.00	30.0	6.52
④ ₂	含泥粉细砂	1.90	4.00	29.6	6.89
④ ₃	含泥中粗砂	1.98	0.00	32.0	7.40
④ ₄	含泥砂卵石	1.90	-	36.0	8.14
⑦ ₁	强风化凝灰岩	2.00	-	-	-
岩土分层	变形模量 E_0 / MPa	渗透系数 $K / (m \cdot d^{-1})$	静止侧压力数 K	泊松比 μ	土层厚度/m
①	10	1.000	0.49	0.33	1.5
③ ₁	12	0.005	0.43	0.30	4.5
③ ₃	18	5.000	0.39	0.28	1.9
③ ₄	20	8.000	0.35	0.26	5.2
④ ₂	20	5.000	0.39	0.28	10.7
④ ₃	25	10.000	0.35	0.26	10.2
④ ₄	30	15.000	0.30	0.23	4.8
⑦ ₁	120	0.500	-	-	21.2
-	-	-	-	-	-
-	200	-	0.3	-	-

注:连续墙混凝土与内部结构混凝土等级为C30。

2 现场实测分析

2.1 监测方案

盾构隧道先隧后井施工法与常规先井后隧施工工法相比,接收井、隧道及土层之间相互作用,相互约束不同,施工中接收井和隧道结构对基坑支护结构体系及盾构施工安全措施等要求均存在较大差异。施工过程中,为了保证工程质量、施工的安全及相关结构得到优化,

需进行必要的现场监测。

该项目基坑监测内容包括:(1)地下连续墙顶位移;(2)地下连续墙墙身水平位移;(3)内支撑轴力;(4)基坑周边地下水位;(5)周围的地表及建筑物沉降;(6)靠近连续墙20环管片竖向位移监测。本文对基坑围护墙、墙外水位及隧道竖向位移实测结果进行分析,以考察先隧后井施工中基坑受力变形特性,得到与常规先井后隧施工的区别。基坑支护结构测点布置图如图2所示。

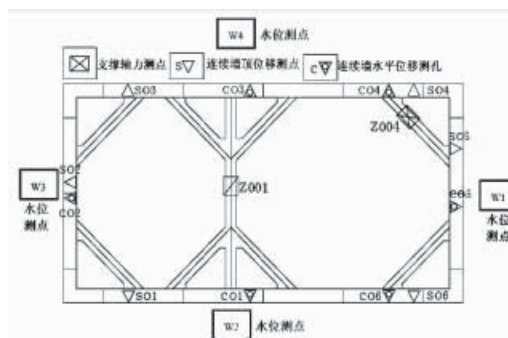


图2 接收井基坑监测点布置图

2.2 连续墙位移结果分析

图3为不同施工阶段连续墙测点CO5水平位移。由图3可知,不同施工阶段水平位移随深度的变化规律除坑顶略有不同外,其它位置具有相同的趋势,均因基坑开挖卸载应力释放,致围护结构向临空面移动。基坑开挖到6.5m处至盾构隧道施工结束,连续墙随着深度大致呈现平缓的“弓形”,而隧道施工完,后续基坑开挖三个阶段中墙体水平位移随着深度呈现曲率较大的“弓形”形状。

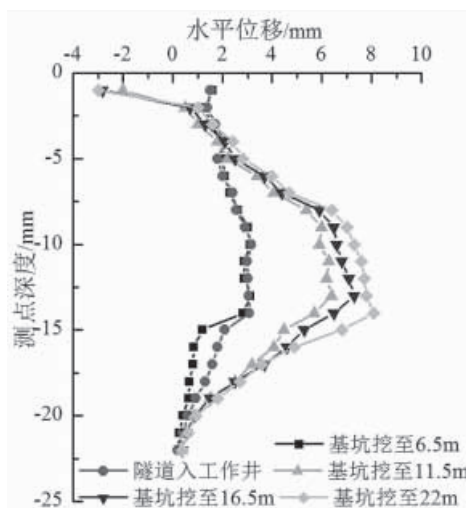


图3 测点CO5不同施工阶段的水平位移

对比基坑开挖至 6.5 m 阶段与隧道入接收井围护墙水平位移曲线可知,隧道入接收井引起连续墙连接隧道处局部位移增大,究其原因是隧道入接收井过程中,接收井的内外出现了较大的水土压力差,故盾构隧道入接收井有必要进行坑外局部加固。基坑开挖至 11.5 m 位置时,墙体水平位移出现了向基坑外的位移,这是由于基坑围护结构采用的是柔性围护结构,且土层刚度较小,坑边地表沉降出现近似“勺形”(图 4),随着开挖深度增大,连续墙顶局部出现向基坑外侧移动。

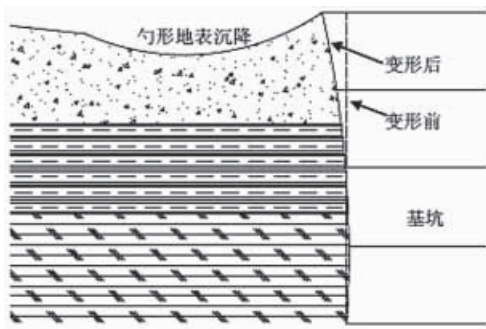


图 4 基坑边地表沉降示意图

图 5 为连续墙顶的竖向位移。可见,基坑开挖引起坑底回弹带动连续墙上抬,竖向位移随着开挖深度呈现增大趋势。基坑开挖至盾构隧道进入接收井过程中,基坑竖向位移缓慢增长。盾构施工完,受后续基坑开挖上抬影响,围护墙竖向位移明显增大,然后趋于平缓。这一现象说明后续基坑开挖卸载引起局部结构上抬,解释了文献[2]盾构隧道先隧后井施工中,受后续基坑开挖影响,近基坑侧局部盾构管片竖向位移增大现象。

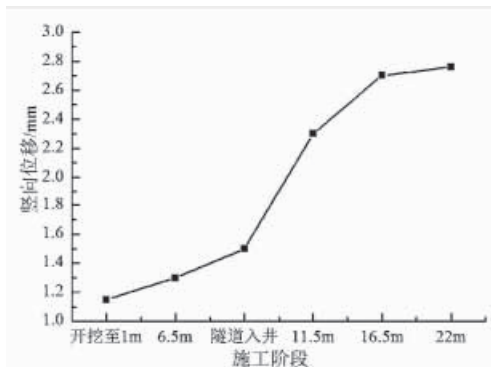


图 5 测点 SO5 墙顶竖向位移

2.3 盾构隧道纵向位移结果分析

针对先隧后井施工法特点,该项目设定了隧道竖向位移监测项。取 20 环管片,编号由基坑侧向外围依次为 1#~20#,监测点布置在管片拱底,如图 6 所示。根据

实测结果,得到如图 7 所示的盾构入接收井与基坑开挖至坑底位置两个施工阶段管片竖向位移曲线图。

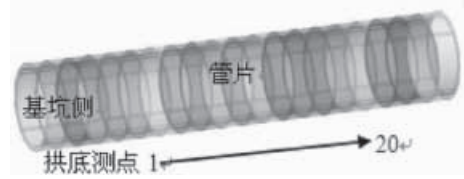


图 6 盾构管片监测点布置示意图

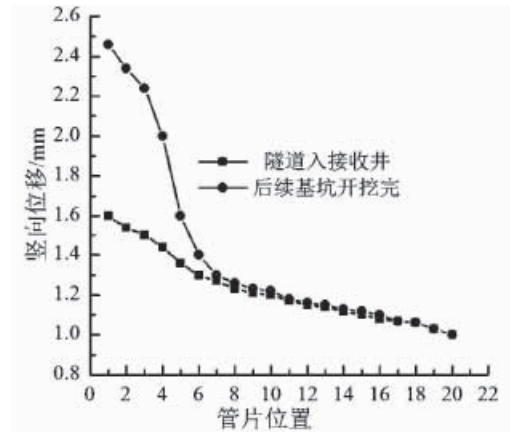


图 7 盾构隧道竖向位移曲线

由图 7 可知,隧道开挖后竖向位移出现整体上抬,受后续基坑开挖影响,隧道靠近基坑侧局部上浮明显增大,主要影响范围在近基坑侧 6 环管片,因此盾构隧道先隧后井施工中,后续基坑开挖对隧道产生了影响,尤其在靠近基坑侧 6 环管片,建议施工阶段坑外局部加固着重在近基坑侧 6 环管片范围内。

2.4 地下水位监测结果分析

地下水位下降会引起土体附加应力增加,从而造成土体的附加沉降,故施工中应对基坑外地下水位进行严格监测,控制其下降幅度不能过大。基坑周边设置 4 个典型水位孔(W1~W4),通过电测水位计量地下水,测线采用平行电缆制作,并做好深度标记。实测水位深度随时间的变化情况,得到不同施工阶段水位深度如图 8 所示。

由图 8 可知,施工阶段水位总体上呈现下降趋势。在测点 W1 处隧道入接收井施工过程水位降幅增大,约为前一阶段降幅的 3.8 倍,这是由隧道入井时形成了较大的水头差,致使部分水流渗入接收井,引起水位下降幅度增大。除了以上监测措施外,需定期由经验丰富的工程师对支护体系渗水情况及管片的渗漏情况进行实地观测,发现隐患及时处理,避免病害发展。

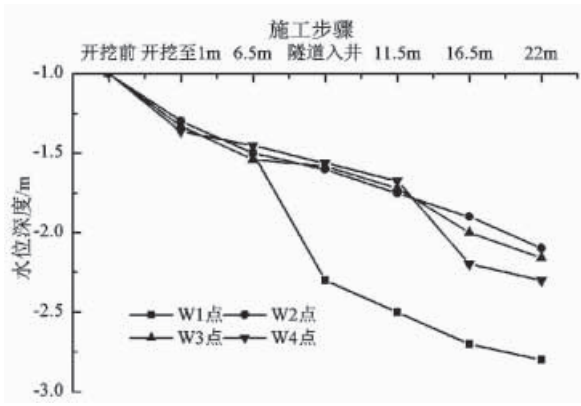


图8 坑外地下水不同施工阶段变化曲线

3 盾构管片张开量计算

先隧后井施工中后续基坑开挖对盾构隧道局部纵向变形影响较大,而纵向变形必然带动管片接头张开,本文借助大型有限元软件,采用荷载结构法分析后续基坑开挖对管片张开量的影响规律。

土层对盾构隧道的作用通过设置地基弹簧实现。该项目隧道埋深为18.5 m,由参考文献[6-7]可知,计算需考虑土拱效应,即认为土层可以承受拉力;基于这一考虑,设置全周径向拉、压弹簧。单宽径向地基反力系数^[8,9]:

$$k_r = \frac{3E}{(1 + \nu)(5 - 6\nu)} \quad (1)$$

式中: k_r 为径向反力系数, E 为弹性模量, ν 为土层泊松比。根据表1参数可计算 $k_r = 14.1 \text{ MPa/m}$ 。取地基弹簧长度为0.5 m,以确保大于弹簧实际变形。

不考虑施工期间动水压力,假定管片主要承受外部的静水压力,如图9所示。计算拱顶与拱底水压分别为185 kPa和245 kPa。土压力计算采用Terzaghi理论计算松动土压力^[10]。

洞顶松动半宽为:

$$B_1 = R_0 \cot\left(\frac{\pi/4 + \varphi/2}{2}\right) \quad (2)$$

松动高度为:

$$h_0 = \frac{B_1 \left(1 - \frac{c}{B_1 \gamma}\right)}{K_0 \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot \frac{H}{B_1}}\right) + \frac{p_0}{\gamma} e^{-K_0 \tan \varphi \cdot \frac{H}{B_1}} \quad (3)$$

式中: R_0 为管片外径(m); φ 为土体的内摩擦角($^\circ$); $k_0 = 1 - \sin \varphi' = 0.507$ 为侧压力系数; γ 为土层的重度(kN/m^3); H 为上覆土厚度(m); p_0 为地面超载(kPa),取20 kPa。

代入表1参数,计算得到如图9所示的衬砌结构受力图。

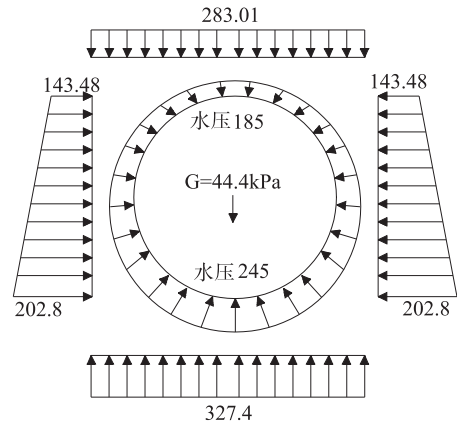
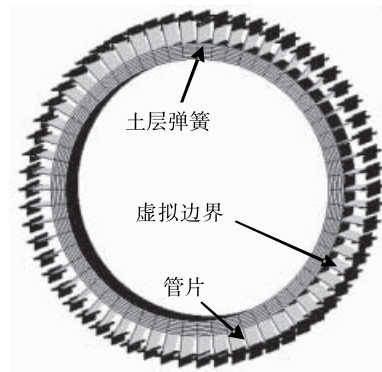


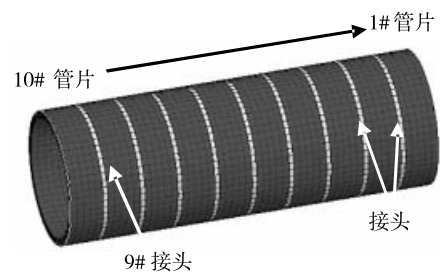
图9 带裂缝衬砌结构受力图(单位:kPa)

计算模型中管片与接头均采用实体单元模拟,采用弹性本构模型。实际弯曲接头等效成直接头刚度为 $5.4 \times 10^7 \text{ kPa}$ ^[11];根据软件本身特点,建立全周管片实体接头,但仅在实际管片接头处赋予接头刚度,其它位置则采用单位刚度。分析可知,隧道影响区域主要在近基坑侧6环管片范围,故数值计算取近基坑侧10环管片,9个接头分析,计算模型如图10所示,定义近基坑侧为10#管片,对应9#接头。

本文通过在近基坑侧第一环管片施加强制竖向位



(a) 总体模型图



(b) 盾构管片与接头(属性显示图)

图10 有限元计算模型图

移,以模拟后续基坑开挖对隧道的影响。图 11 为管片竖向位移云图,近基坑侧 10#管片竖向位移为 2.389 mm,即基坑开挖引起的竖向位移。

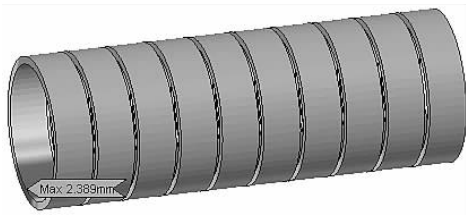


图 11 管片竖向位移云图

根据实体接头相对位移算出管片接头张开量如图 12 所示。

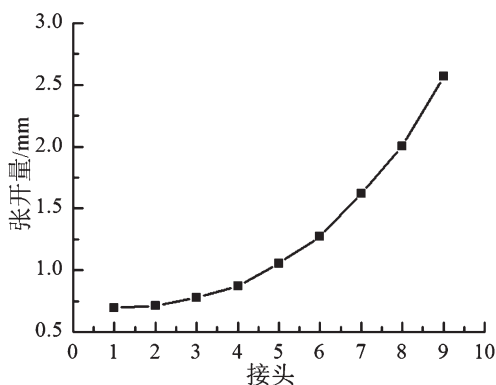


图 12 管片张开量

由图 12 可知,管片张开量呈现由 1#接头向 9#接头增大的趋势,最大值出现在 9#接头处为 2.57 mm,小于广州地铁接头纵缝张开量控制值 3 mm^[12],未出现渗漏。第 6 个接头开始变形超过螺栓弹性极限变形值 1.11 mm^[13],开始产生塑性变形,该接头之前均处于弹性状态,因此,先隧后井施工法对管片张开量的影响较大的范围主要在距离接收井 5 环管片长度内,即后 4 个接头处。

4 结 论

(1) 隧道入接收井时连续墙内外会产生较大的水土压力差,引起与隧道连接处局部围护墙水平位移增大与坑外水位下降。

(2) 盾构隧道先隧后井施工中,后续基坑开挖对隧道变形产生了显著影响,主要影响区域在靠近基坑侧 6 环管片范围内。

(3) 先隧后井施工法对管片张开量的影响较大的范

围主要在距离接收井 5 环管片长度内,即后 4 个接头处。出于安全考虑,建议施工阶段对坑外近基坑侧 6 环管片范围土层进行局部加固。

参 考 文 献:

- [1] 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 1):2870-2877.
- [2] Yang Chunshan, Mo Haihong, Chen Junsheng. Selection of reasonable scheme of entering into a working well in shield construction[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 3987-3998.
- [3] Yang Chunshan, Mo Haihong, Chen Junsheng, et al. Segment opening calculation of shield tunnel based on double-sided elastic foundation beam when tunnel followed by well excavation[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 6067-6079.
- [4] 魏新江,郭志威,魏纲,等.考虑渗流影响的盾构出洞灾害机制研究[J].岩土力学,2011,32(1):106-110.
- [5] 赵峻,戴海蛟.盾构法隧道软土地层盾构进出洞施工技术[J].岩石力学与工程学报,2004,23(增 2): 5147-5152.
- [6] Duddeck H, Heinz E. On structural design models for tunnels in soft soil[J]. Underground Space, 1985, 9(56): 246-259.
- [7] 朱合华,崔茂玉,杨金松.盾构衬砌管片的设计模型与荷载分布的研究[J].岩土工程学报,2000,22(2): 190-194.
- [8] Muir A M. The circular tunnel in Elastic Ground[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 115-127.
- [9] Yang Chunshan, Mo Haihong, Chen Junsheng. Numerical study on material optimization of the composite lining of shield tunneling[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 3813-3824.
- [10] 陈俊生.盾构隧道管片力学行为研究[D].广州:华南理工大学,2007.
- [11] 陈俊生,莫海鸿.盾构隧道管片施工阶段力学行为的三维有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2006,

- 25(增2):3482-3489.
- [12] 胡国新,刘庭金,陈俊生,等.基坑三维渗流对紧邻区间隧道影响的数值分析[J].铁道建筑,2007(7):42-44.
- [13] 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.

Characteristics Analysis of Tunnel First Well after Construction Method for Shield Tunnel

LI Guoxiong¹, YANG Chunshan²

(1. Guangdong Zhonggong Architectural Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510034, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to clearly obtain the characteristics of the method that tunnel is first constructed followed by the excavation of working well (tunnel first well after), field measurement and finite method are conducted to explore deformation characteristics of working well and shield tunnel as well as the distribution rule of the opening measure of shield segment combined with a typical engineering instance. The results show that it forms a great water and soil pressure difference inside and outside the hole, which will cause the enlargement of horizontal displacement of local diaphragm wall at the tunnel junction and the decline of water level outside the hole when shield enters into the working well. For the influence of the follow-up foundation well excavation, the vertical displacements of 6 rings shield segment near the foundation well increase significantly, and four shield segment joints near the foundation well are in the plastic deformation, so analysis of seepage control during the construction can be considered emphatically for 6 rings shield segment near the work well. Based on safety considerations, it is suggested to do local reinforcement of the soil body in 6 segment length near the foundation well.

Key words: shield tunnel; deformation characteristics; opening measure; measured analysis; finite element method; tunnel is first excavated followed by the working well