

## 大直径泥水盾构下穿地铁挡墙路基沉降控制

马文辉<sup>1</sup>, 杨成永<sup>1</sup>, 彭华<sup>1†</sup>, 白雁<sup>1</sup>, 程霖<sup>1</sup>, 高利宏<sup>2</sup>, 刘志暘<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100044)

**摘要:**为研究泥水盾构双洞先后下穿施工影响下既有挡墙式路基的沉降控制措施, 依托京沈客专望京双洞盾构隧道施工下穿北京机场线路路基工程, 通过分析现场监测数据及盾构施工参数, 在阐明了路基的沉降规律基础上, 总结了控制沉降的盾构施工参数调控和注浆加固、沉降补偿的经验。研究表明:掘进各参数间、泥浆各参数间的关联密切;合理且较高的顶推力和泥水压力、较高比重和黏度的浆液可确保在地层扰动小的情况下盾构快速通过穿越段;理论注浆量 2.5 倍的同步注浆量和大于泥水仓压力 0.15~0.2 MPa 的注浆压力可确保盾尾建筑空隙充填密实;地表预注浆充分改良加固了地层、适度抬升了路基, 注浆压力 1.2 MPa 的地表跟踪注浆及时有效地抑制、补偿了路基沉降, 注浆压力 1.2 MPa 和速度 100 L/min 的隧洞内加强注浆减小了路基工后沉降。

**关键词:**盾构隧道施工; 穿越施工; 挡墙路基; 沉降监测; 施工参数; 沉降控制

**中图分类号:** U25

**文献标志码:** A

## Settlement Control on Retaining Wall Embankment Affected by Underneath Traversing Large-diameter Slurry Shield Tunnels

MA Wenhui<sup>1</sup>, YANG Chengyong<sup>1</sup>, PENG Hua<sup>1†</sup>, BAI Yan<sup>1</sup>,  
CHENG Lin<sup>1</sup>, GAO Lihong<sup>2</sup>, LIU Zhiyang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Subway Ltd, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To investigate the settlement control measurement on the retaining wall embankment under the dual slurry shield tunnels underneath traversing construction, taking the retaining wall embankment in Beijing Capital Airport Express Line at Wangjing on Beijing-Shenyang passenger high-speed railway line as engineering background, in-situ settlement monitoring data and shield construction parameters were analyzed. Settlement regulations of the embankment were narrated. Experiences on real-time adjustment of shield construction parameters, comprehensive use of pre-grouting, supplementary grouting and secondary grouting were summarized. The measurement results show that the relationship among tunneling parameters, as well as slurry parameters, is close. A relatively high thrust force, slurry pressure, slurry unit weight and slurry viscosity are the key parameters that ensure the shield to traverse quickly and safely with small disturbance to the embankment. Synchronous grouting at a pressure is 0.15~0.2 MPa greater than the slurry pressure and with a volume about 2.5 times the theoretical value can fully fill the shield

\* 收稿日期: 2018-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478032, 51578053), National Natural Science Foundation of China(51478032, 51578053)

作者简介: 马文辉(1989—), 男, 河北涿州人, 北京交通大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: hpeng@bjtu.edu.cn

tail void. Ground pre-grouting effectively improves the soil and moderately raises the embankment. Ground supplementary grouting at a pressure of 1.2 MPa can timely restrain and even compensate the settlement of the embankment. Secondary grouting in tunnels at a pressure of 1.2 MPa and a speed of 100 L/min reduces the post-construction settlement of the embankment.

**Key words:** shield-driven tunnel excavation; traversing construction; retaining wall embankment; settlement monitor; construction parameters; settlement control

在城市建设中,铁路的地下化由于能够避免铁路对城市空间的分割而日渐受到重视<sup>[1]</sup>.城市中的铁路隧道建设往往采用大直径的泥水盾构.泥水盾构常通过调控掘进、泥浆以及注浆的参数来减小施工对周边建筑物的影响<sup>[2]</sup>.然而目前鲜有大直径泥水盾构穿越既有地铁的工程经验,大直径泥水盾构双洞先后穿越既有地铁挡墙式路基的案例更是极为少见.开展此类工程的沉降控制研究对保证既有地铁安全运营有着较大的工程借鉴意义.

针对泥水盾构穿越施工引起的地层及周边建筑物沉降控制的方法,许多学者依托不同的工程做了一定的研究.袁大军等<sup>[3]</sup>以南京长江隧道大直径泥水盾构施工为依托,通过现场监测,研究了施工对地层的扰动机制和规律、影响范围和程度.伍振志等<sup>[4]</sup>分析了上海长江隧道泥水盾构穿越民房段前的试验段地表沉降数据,预测了施工对民房的影响程度,制定了地表沉降控制措施并得到了验证.Xie等<sup>[5]</sup>以上海迎宾三路隧道大直径泥水盾构施工为依托,采用数值模拟方法,结合现场监测,提出了施工影响下地表沉降的预测方法.房倩等<sup>[6]</sup>以南京纬三路过江通道大直径泥水盾构施工为依托,通过现场监测,研究了盾构在砂、砂卵石地层中掘进引起的地表沉降过程和分布规律.林存刚等<sup>[7-9]</sup>、张忠苗等<sup>[10,11]</sup>以杭州庆春路过江隧道泥水盾构掘进施工为依托,讨论了盾构施工参数对地表沉降影响,总结了施工引起地层沉降的机理及控制措施,提出了考虑盾构顶推力、注浆压力的预测地面隆沉的Mindlin解法.吴世明等<sup>[12]</sup>以杭州庆春路过江隧道泥水盾构穿越钱塘江南岸大堤施工为依托,论证了通过优化泥水压力、盾构姿态、同步注浆等盾构施工参数,可以确保堤防结构和施工的安全.周松等<sup>[13]</sup>以上海仙霞西路隧道大直径泥水盾构穿越虹桥机场绕滑道施工为依托,通过试验研究了盾构施工参数的调控规律,分析了施工影响下机场滑道的沉降规律.梁浩等<sup>[14]</sup>以上海地铁11号线泥水盾构穿越吹填土地层施工为依托,讨论了施工

影响下地表沉降的规律以及注浆抬升地表措施的效果.Mooney等<sup>[15]</sup>以纽约皇后隧道泥水盾构施工为依托,采用数值模拟方法,结合地表沉降数据,讨论了盾构空隙和注浆参数对地表沉降的影响.谢雄耀等<sup>[16]</sup>以南宁地铁泥水盾构下穿居民楼施工为依托,分析了盾构掘进参数的变化规律,在提出袖阀管注浆加固措施的同时给出了富水强渗透圆砾地层注浆浆液配比.李承辉等<sup>[17]</sup>以兰州地铁泥水盾构穿越黄河施工为依托,总结了盾构掘进参数设定、穿越黄河风险控制等方面的经验.

目前研究成果多数在探讨总结泥水盾构穿越施工影响下地表沉降的规律及其控制,缺少针对穿越施工影响下地铁路基尤其是挡墙式路基沉降的规律及其控制方法的研究;同时对盾构施工参数的讨论也仅局限于泥水压力、同步注浆等个别参数,缺少针对掘进、泥浆、注浆等多参数的综合研究.

京沈客专望京双洞单线隧道采用大直径泥水盾构施工,在DK19+190~DK19+980段下穿北京地铁机场线挡墙式路基段.本文通过分析盾构施工参数,以及地表预注浆和跟踪注浆、隧洞内加强注浆影响下路基沉降的规律,总结了泥水盾构穿越施工中路基沉降控制的方法及其经验,为类似工程提供参考.

## 1 工程背景

新建隧道施工采用了中铁气垫-泥水平衡式盾构,刀盘直径10.9 m,最大刀盘转速1.8 r/min,最大掘进速度50 mm/min,最大推力123 800 kN.

如图1所示,新建隧道外径10.5 m,由9块衬砌管片组成,管片厚0.5 m,环宽2 m;双洞中心线间距23.2 m.

1-1剖面如图2所示,新建隧道顶部埋深17.4 m,距离既有CFG桩底5.4 m,与既有路基平面交角55°.穿越位置处于第四系冲洪积地层,无承压水,地层构成及其主要参数如表1所示.隧道洞身位于黏土、粉土、粉质黏土和细砂的交错地层.

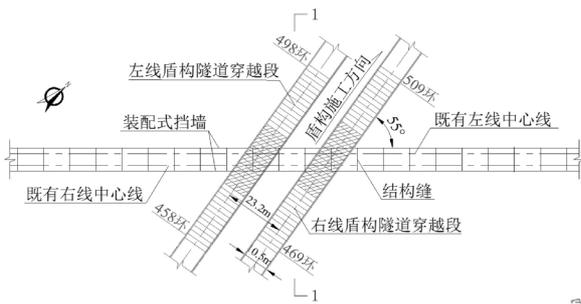


图1 穿越施工平面图

Fig. 1 Layout of construction site

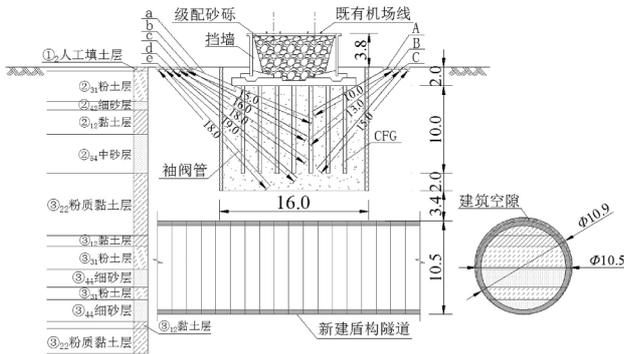


图2 穿越施工纵剖面图(单位:m)

Fig. 2 Longitudinal profile of construction site (unit:m)

表1 地层参数

Tab. 1 Properties of soil strata

地层名称	层厚 /m	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 / $(^\circ)$
① <sub>2</sub> 人工填土	0.5	1 800	32.7	—	8	10
② <sub>31</sub> 粉土	3.4	1 840	5	0.34	18	22
② <sub>42</sub> 细砂	0.9	1 950	29	0.25	0	29
② <sub>12</sub> 黏土	2.8	1 920	25	0.33	43	12
② <sub>34</sub> 中砂	4.4	2 030	44	0.30	0	35
③ <sub>22</sub> 粉质黏土	7.0	1 990	7	0.40	28	12
③ <sub>12</sub> 黏土	1.2	1 890	26	0.32	46	10
③ <sub>31</sub> 粉土	2.6	1 870	8	0.35	20	23
③ <sub>44</sub> 细砂	2.0	2 000	26	0.24	0	30
③ <sub>31</sub> 粉土	1.4	1 850	7	0.33	19	24
③ <sub>44</sub> 细砂	2.5	1 980	27	0.25	0	32
③ <sub>12</sub> 黏土	0.8	1 900	23	0.30	47	10
③ <sub>22</sub> 粉质黏土	2.8	2 000	8	0.41	27	11

既有地铁为地面高填方悬臂式挡墙路基结构,挡墙面板为1.98 m/块的预制板,基底设凸榫,墙背设肋;墙底基础为现浇钢筋混凝土结构,每10 m设置一道结构缝;基础下方横纵向均匀布置了

$\Phi 400@1900$ CFG桩,桩长10 m.

位于路基下方的左线隧道第458~498环和右线隧道第469~509环为施工穿越段,其中各有10环位于路基正下方.

挡墙式路基由位于地表的挡墙、地下的墙基及CFG群桩共同构成,在线路纵向上,其结构缝较多、联结性较弱;而在线路竖向上,其每组结构单元的整体性又优于传统路基结构.新建盾构隧道距离CFG桩端较近,盾构施工的影响势必会由桩基迅速反映至路基乃至轨道结构.故而在穿越施工时需要实时监测路基沉降,密切关注结构单元间的沉降差异,及时调控优化盾构施工参数,采取必要的地层改良和沉降补偿措施.

## 2 现场施工及沉降控制措施效果分析

为了实时地掌握路基的沉降情况,在穿越施工影响范围内的既有左右线轨道板的中心线位置布置了Z1~Z15和Y1~Y15计30组沉降自动化测点,同时第1~13块轨道板基础布置了沉降人工测点,如图3所示.

新建右线盾构在2017年8月10日17:00~8月17日5:15、左线盾构在11月28日9:00~12月3日17:15先后完成了穿越路基的施工.

路基沉降自动化监测数据自2017年7月10日1:30开始采集,8月10日至12月3日(穿越施工期间),监测频率为1次/(2 h);其他时间,监测频率为1次/d.既有轨道板基础沉降的人工监测频率为1次/d.

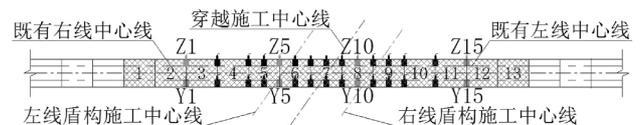


图3 沉降自动化测点的布置

Fig. 3 Distribution of automatic measured points

以新建隧道与既有线路中心线交点处的Y6、Y11测点的监测数据为代表,通过分析得到了路基的沉降曲线,如图4所示.

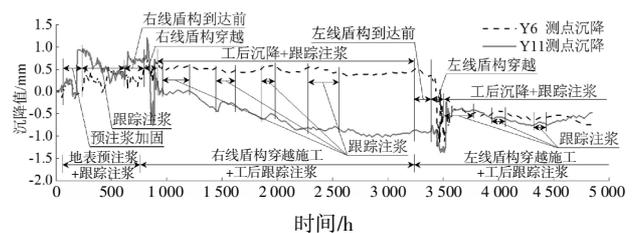


图4 路基沉降时程曲线

Fig. 4 Time history curves of embankment settlement

由图4不难发现,现场施工的过程可大致划分为“地表预注浆+跟踪注浆”阶段、“右线盾构穿越施工+工后跟踪注浆”阶段和“左线盾构穿越施工+工后跟踪注浆”阶段等3个阶段.控制路基沉降的措施包括了地表预注浆、盾构施工参数调控、隧洞内加强注浆以及跟踪注浆等,下面对控制措施及其效果逐一地进行分析.

### 2.1 地表预注浆及跟踪注浆措施

为了避免盾构穿越施工侵扰路基下方CFG群桩的桩端土,采用地表袖阀管注浆技术加固改良桩端、桩侧土.穿越施工影响的130 m路基段分成主、次影响区,如图5所示.如图2、图6所示,在主影响区内,路基两侧分别放射式地布置了A~C计3排和a~e计5排 $\Phi 42$ 袖阀管,袖阀管长度10~19 m,钻孔排距、孔距均为0.75 m;在次影响区内,路基两侧分别放射式地布置了2排 $\Phi 42$ 袖阀管,其与主影响区内A、C、b、d等4排袖阀管的长度和管位一致.通过地表预注浆,在路基下方形成宽16 m、深12 m的加固区域.注浆采用普通水泥浆液(水灰比0.8:1)后退式分段注浆.

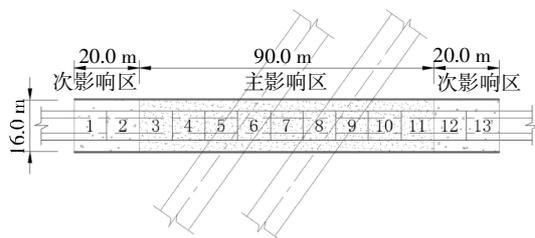


图5 注浆加固范围平面图  
Fig. 5 Grouting-reinforced area

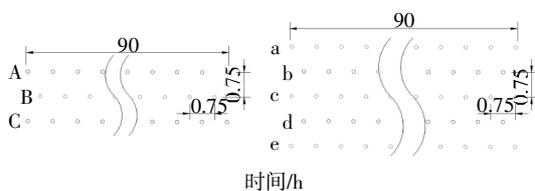


图6 钻孔平面布置图(单位:m)  
Fig. 6 Layout of boreholes (unit: m)

主次影响区的预注浆加固完成后,清洗主影响区的注浆管,间隔保留其中的A、C、b、d计4排袖阀管作为跟踪注浆管.

在预注浆前设置试验段,每排袖阀管中每隔4根试注浆1根,注浆压力由0.4 MPa逐步提高至0.7 MPa,注浆速度控制在50~70 L/min,每孔多次注浆,注浆时间间隔24 h.如图7所示,试验段注浆期间,路基波动上浮至+0.3 mm;停止注浆后,因原状土受

到扰动,路基随注浆压力释放、浆液固结而略微下沉至-0.12 mm.

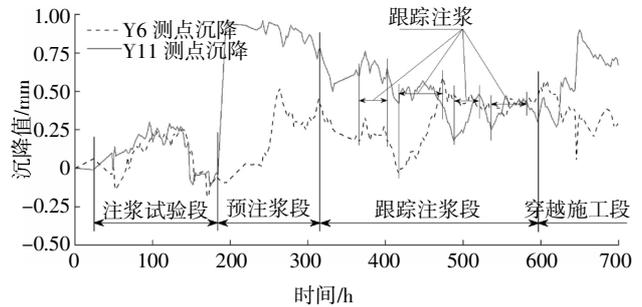


图7 地表注浆阶段测点沉降图  
Fig. 7 Settlement of embankment at measured points during ground grouting

随后在预注浆期间,注浆压力、注浆速度分别稳定在1.0~1.1 MPa、70~90 L/min.路基的竖向整体性较强,对注浆压力、注浆速度等参数的变化较为敏感,其中Y11测点在60 h内迅速由-0.04 mm上浮至+0.96 mm,并保持波动稳定.

注浆浆液中虽添加有补偿收缩膨胀剂,但随注浆的停止和浆液的固结,路基产生了下沉趋势.为了抑制路基下沉,先后进行了4次跟踪注浆,每次注浆的压力为1.2 MPa,平均速度为60 L/min.跟踪注浆使路基沉降维持在+0.4 mm,为穿越施工预留了条件.

### 2.2 盾构施工参数调控措施

泥水盾构施工时通过微调气垫仓压力以控制泥水压力,进而平衡开挖面的水土压力<sup>[18-20]</sup>.提取在左右线盾构穿越施工阶段,路基的沉降监测结果如图8所示.

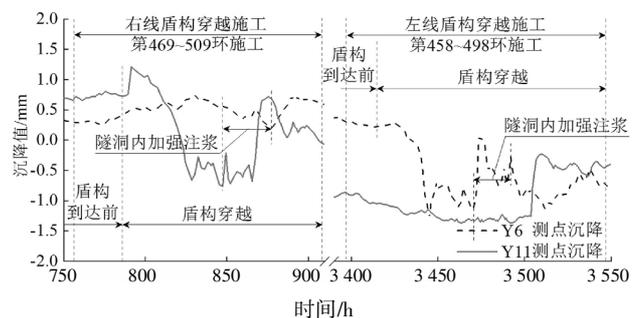


图8 穿越施工阶段测点沉降图  
Fig. 8 Settlement of embankment at measured points during traversing

在右线盾构穿越施工阶段:在盾构到达穿越段前,Y11测点受施工影响即产生了小幅的波动上浮,稳定在+0.7 mm左右.随着盾构进入穿越段,Y11测点上浮达到了+1.21 mm;随着盾构刀盘侵入路基,

Y11 测点随即迅速下沉至-0.76 mm; 直至盾构机通过后, 通过隧洞内的加强注浆, Y11 测点上浮回升至+0.72 mm. 在右线盾构穿越施工过程中, Y6 测点的沉降规律与 Y11 测点一致, 但幅度较小.

在左线盾构穿越施工阶段: 随着盾构进入穿越段, Y6 测点产生了小幅的下沉至+0.21 mm; 随着盾构刀盘侵入路基, Y6 测点迅速下沉至-1.28 mm; 盾构机通过后, 通过隧洞内的加强注浆, Y6 测点上浮回升至-0.31 mm.

如图 4 所示, 在右线盾构穿越施工结束后的 103 d 和左线盾构穿越施工结束后, 先后 7 次 (4 次+3 次) 视路基沉降的纵向分布情况, 进行了跟踪注浆, 有效地抑制甚至纠正了路基沉降. 跟踪注浆的压力稳定在 1.1 MPa, 速度为 30~60 L/min, 注浆范围和速度根据实时反馈的沉降监测数据及时调整.

将路基沉降自动化测点在右、左线盾构穿越施工结束及工后沉降稳定等 3 个阶段的监测值拟合出路基沉降槽曲线, 如图 9 所示. 在右、左线盾构先后穿越施工结束后, 沉降槽曲线呈现出了由“V”型到“U”型的变化. 同时由于在路基纵向上进行了多次的跟踪注浆, 沉降槽曲线并不平滑; 由于跟踪注浆的抬升作用, 在路基沉降稳定后, 沉降槽曲线最终呈现出了“W”型.

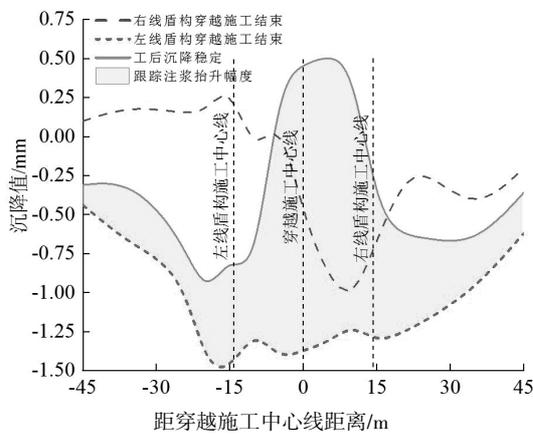


图 9 路基沉降槽曲线图

为了便于对比左右线盾构掘进、泥浆、注浆等施工参数的变化趋势, 下面的讨论中将左线隧道第 458~498 环和右线隧道第 469~509 环的不同施工参数绘制在了以环数为横坐标的图中.

2.2.1 掘进参数分析

泥水盾构掘进参数主要包括了泥水压力、掘进速度、顶推力、刀盘扭矩以及刀盘转速. 穿越段的左右线盾构掘进参数的统计数据如表 2, 绘制如图 10.

表 2 盾构掘进参数  
Tab.2 Shield tunneling parameters

掘进参数	右线盾构			左线盾构		
	MIN	MAX	均值	MIN	MAX	均值
泥水压力 /MPa	0.200	0.213	0.209	0.200	0.217	0.210
掘进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	20	26	23	22	37	26
顶推力 /kN	31 375	44 877	36 288	34 000	60 000	48 366
刀盘扭矩/(MN·m)	3.43	5.16	4.33	4.10	5.80	5.07
刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1.01	1.09	1.05	1.02	1.9	1.03

分析表 2 和图 10 不难发现: 左线盾构掘进参数相比右线, 泥水压力由 0.209 MPa 提高至 0.210 MPa, 位于路基正下方的左线盾构泥水压力均值更是提高至 0.215 MPa; 掘进速度在保持匀速前提下由 23 mm/min 提高至 26 mm/min; 顶推力提高了 1.3 倍至 48 366 kN, 同时刀盘扭矩也随之提高了 1.2 倍至 5.07 MN·m; 而刀盘转速则由 1.05 r/min 降低至 1.03 r/min, 且波动幅度减小.

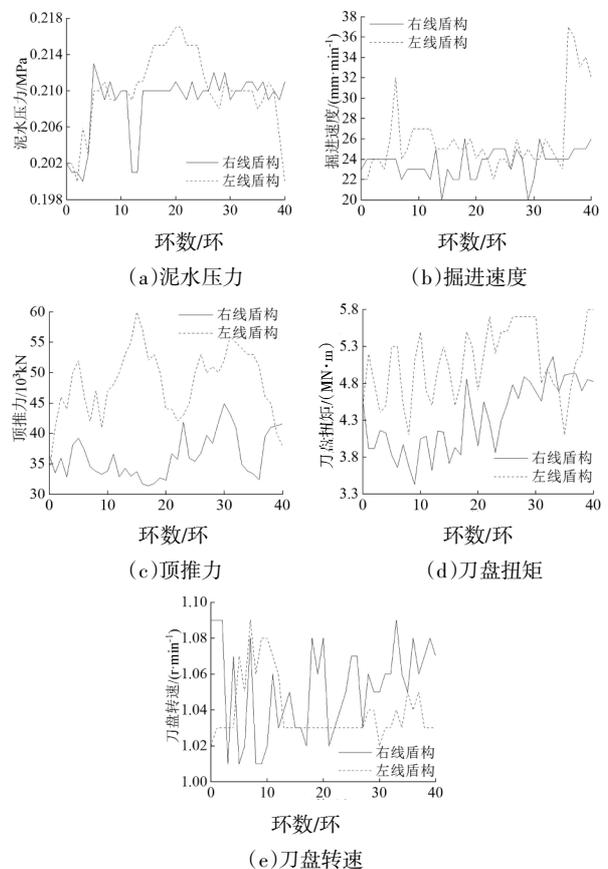


图 10 盾构掘进参数曲线

Fig. 10 Curves of shield tunneling parameters

综合分析盾构掘进参数变化与路基沉降的关系可知:合理且较高的泥水压力、顶推力,均匀且较快的掘进速度,平稳且较低的刀盘转速,可在减小刀盘对地层的扰动、开挖面维持稳定的前提下,确保盾构快速通过穿越段. 泥水压力宜控制在 0.212~0.216 MPa,调整幅度不大于 0.005 MPa;顶推力宜控制在 47 000~51 000 kN;掘进速度宜保持在 26~28 mm/min,可有效地减小施工对路基沉降影响.

2.2.2 泥浆参数分析

泥水盾构主要通过控制泥浆的比重与黏度保证泥浆的质量.泥浆由膨润土、CMC、纯碱、水组成,配合比为 60:0.28:3.3:1 000.盾构每掘进 2 环拌制 1 次新鲜泥浆用于调整泥浆指标.

穿越段的左右线盾构泥浆参数的统计数据如表 3,绘制如图 11.

表 3 盾构泥浆参数

Tab.3 Shield slurry parameters

泥浆参数	右线盾构			左线盾构		
	MIN	MAX	均值	MIN	MAX	均值
进浆比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.14	1.22	1.18	1.16	1.25	1.20
排浆比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.17	1.28	1.24	1.20	1.30	1.25
进浆黏度/s	19	20	19.39	18	21	19.53
排浆黏度/s	19	22	20.07	19	22	20.48

分析表 3 和图 11 不难发现:左线盾构泥浆参数相比右线,进浆比重由 1.18 g/cm<sup>3</sup> 提高至 1.20 g/cm<sup>3</sup>,进浆黏度由 19.39 s 提高至 19.53 s.

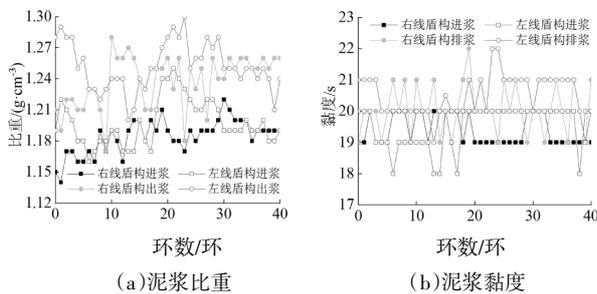


图 11 盾构泥浆参数曲线  
Fig. 11 Curves of shield slurry parameters

综合分析盾构泥浆参数变化与路基沉降的关系可知:较高的浆液比重和黏度有利于维持开挖面的稳定、减小路基的沉降;进浆比重宜保持在 1.19~1.24 g/cm<sup>3</sup>,进浆黏度宜保持在 20~22 s.

除此之外,泥浆的含砂率、析水量以及 pH 值亦

为重要参数.在本工程中,为了保证泥膜的形成与稳定,泥浆含砂率控制在 3%;根据指标监控数据,适量适时地添加纯碱、黏土、膨润土和 CMC,降低含砂率、提高泥浆黏度.同时泥浆的析水量<5%,pH=8.1,胶体率≥96%,失水量≤25 mL/30 min.

2.2.3 同步注浆参数分析

盾尾分六路同时进行同步注浆,及时足量地填充盾尾建筑空隙,达到减小地层沉降、稳定管片结构、控制掘进方向、提高隧道防水能力的目的.同时通过管片注浆孔,每 2 环注射 1 道聚氨酯密封环,封堵、固定管片外侧浆液,避免浆液前后流动.

同步注浆参数主要包括了注浆压力和注浆量.穿越段的左右线盾构同步注浆参数的统计数据如表 4,绘制如图 12.

表 4 盾构同步注浆参数

Tab.4 Shield synchronous grouting parameters

同步注浆参数	右线盾构			左线盾构		
	MIN	MAX	均值	MIN	MAX	均值
注浆压力/MPa	0.25	0.31	0.28	0.28	0.47	0.35
注浆量/m <sup>3</sup>	21	35	27.4	29	35	32.2

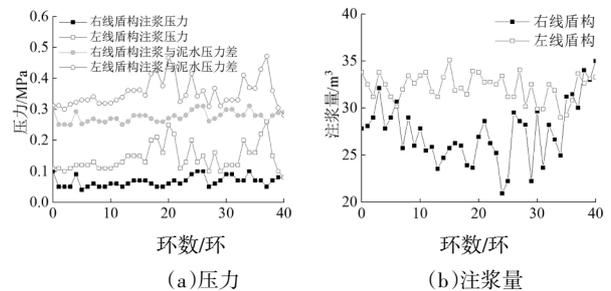


图 12 盾构同步注浆参数曲线

Fig. 12 Curves of shield synchronous grouting parameters

分析表 4 和图 12 不难发现:左线盾构同步注浆参数相比右线,注浆压力由 0.28 MPa 提高至 0.35 MPa,大于同等埋深的泥水仓压力 0.08~0.26 MPa;注浆量由 27.4 m<sup>3</sup> 提高至 32.2 m<sup>3</sup>.

右线盾构施工时,同步注浆浆液选用膨润土-水泥砂浆,由水泥、矿渣粉、粉煤灰、膨润土、细砂、微膨胀剂、絮凝剂以及水组成,质量比 200:50:273:100:350:15:12:1 000,浆液初凝时间为 6~10 h.左线盾构施工时,同步注浆浆液中提高了水泥、粉煤灰的比重,添加了早强剂,使得浆液初凝时间缩短至 4 h,提高了注浆初期的强度和效果.

盾构机的理论注浆量为 13.44 m<sup>3</sup>,右线、左线盾

构实际同步注浆量均值与理论注浆量的比值分别为2.0、2.4.

综合分析盾构同步注浆参数变化与路基沉降的关系可知:合理且较高的注浆压力、注浆量有利于填充盾尾建筑空隙,抑制地层沉降;注浆压力宜控制在0.35~0.4 MPa,大于同等埋深的泥水仓压力0.15~0.2 MPa;注浆量宜控制在32~35 m<sup>3</sup>,为理论注浆量的2.3~2.5倍.

### 2.3 隧洞内加强注浆措施

如图13所示,穿越段的盾构隧道管环增设了17个注浆孔.待管环从盾尾脱出后,通过增设的注浆孔向地层钻设3 m长的注浆管,添加了补偿收缩膨胀剂的超细水泥-水玻璃浆液通过注浆管压注,迅速地填充、支撑地层,抑制甚至减小路基沉降.

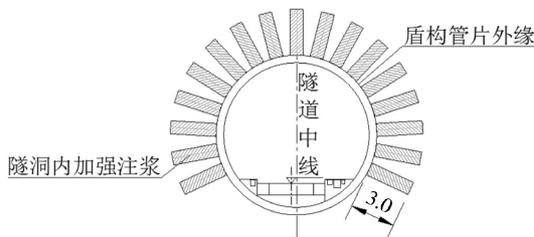


图13 隧洞内加强注浆(单位:m)  
Fig. 13 Reinforcement grouting (unit: m)

左右线盾构在施工时均采取了隧洞内加强注浆措施,减小了路基沉降.分析图8中左线盾构穿越后的路基沉降:待盾构管环从盾尾脱出后,左线隧道即刻开始隧洞内加强注浆,注浆压力、速度分别保持在1.2 MPa、100 L/min,使得路基在15 h内迅速上浮了1.12 mm达到-0.23 mm.

绘制右、左线盾构穿越施工结束时,既有路基13块轨道板基础的人工监测沉降曲线,如图14所示.在右线盾构穿越施工结束后,第1~5块基础受先期地表预注浆加固的影响,呈现上浮状态;而第6~13块基础受穿越施工的影响,呈现近似“U型槽式”沉降.在左线盾构穿越施工结束后,第1~5块基础受左线盾构穿越施工的影响较大而产生下沉,而第6~13块基础受跟踪注浆抬升影响略有上浮,最终13块轨道板基础呈现近似“W型槽式”沉降.不同于普通路基,板式基础的单元结构刚度较大,板间纵向产生了差异沉降,最大差异沉降为0.3 mm.

在穿越施工期间,Y6和Y11测点最大上浮分别为0.74 mm和1.21 mm,最大沉降为-1.3 mm和-1.37 mm.而最终通过沉降自动化监测指导下的预注浆改

良加固地层、盾构施工参数实时调控、隧洞内加强注浆和地表跟踪注浆补偿抬升等措施的综合运用,Y6、Y11测点在-0.7 mm小幅波动并最终稳定.既有地铁运营的安全得到了保证.

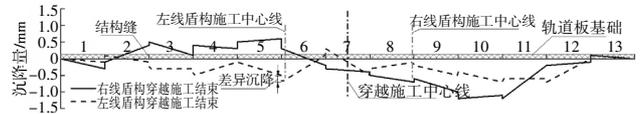


图14 既有轨道板基础沉降曲线  
Fig. 14 Settlement curves of existing slabs

## 3 盾构施工参数的关联分析

前面逐一对比了左右线盾构施工时掘进、泥浆、注浆等3类11种参数的变化特征,但由于各参数的量纲及值域存在差异,难以直观地辨识不同参数之间的关联关系.为此,需要采用线形函数归一化方法<sup>[21]</sup>,力求在同一尺度下揭示不同施工参数间的内在联系,以及关键施工参数对路基沉降的影响.

考虑到左右线盾构施工对路基沉降的影响规律较为一致,下面以左线盾构的施工作为分析对象.

### 3.1 掘进参数的关联关系

顶推力是驱使盾构掘进的主要参数,伴随着盾构的掘进,掘进速度和刀盘扭矩等参数相应变化.将掘进速度与刀盘转速的比值定义为“每转切深”,作为衡量掘进效率的指标<sup>[21]</sup>.分析中先将所用参数做了归一化处理.

如图15可知,随顶推力的增大,每转切深呈现增大的趋势;而随着每环切深的提高,刀盘旋转阻力增大,进而刀盘扭矩增大.

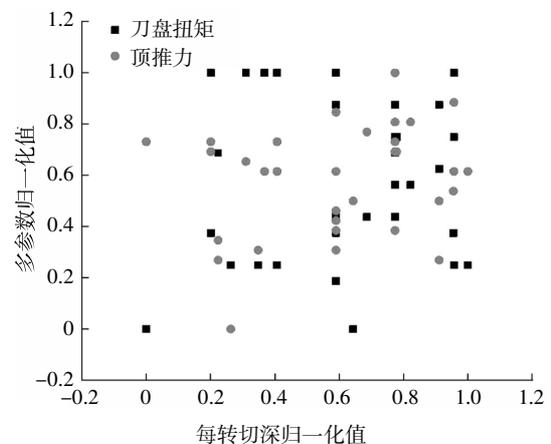


图15 刀盘扭矩、顶推力与每转切深关系  
Fig. 15 Relationship between cutter-head torque, thrust force and cutter depth per revolution

由于受掘进速度和刀盘转速等参数的影响,刀盘扭矩与顶推力的关联关系在图 10 中表征不明确。为此,将刀盘扭矩与顶推力分别除以每转切深,在消除了参数影响后,将得到的新数据分别做归一化处理,绘制图 16。不难发现,新数据间不仅有着相同的变化趋势,且“刀盘扭矩/每转切深”稍滞后于“顶推力/每转切深”发生变化,进一步地表明了刀盘扭矩是在顶推力施加后产生的。

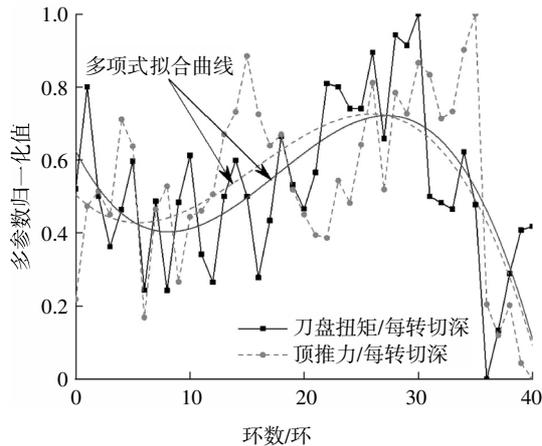
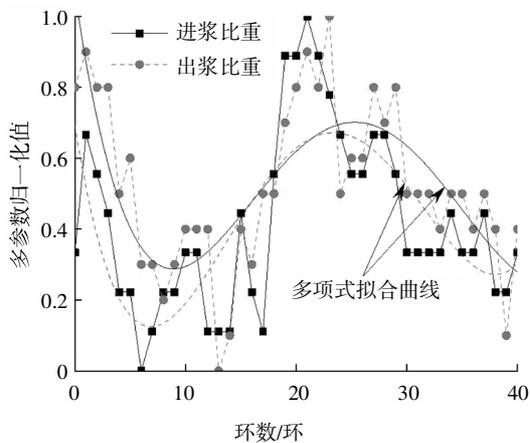


图 16 刀盘扭矩与顶推力相关关系

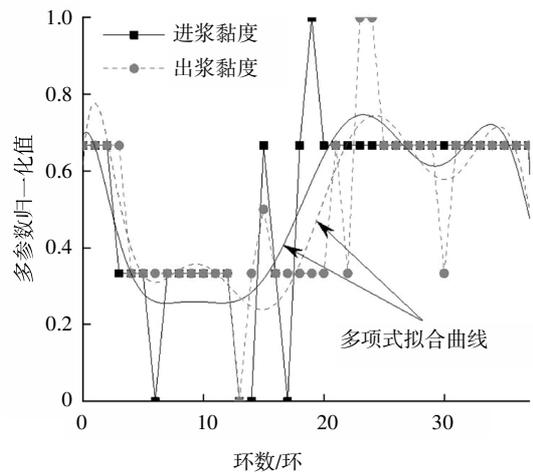
Fig. 16 Relationship between cutter-head torque and thrust force

### 3.2 泥浆参数的关联关系

泥水平衡盾构通过泥浆循环在开挖面形成泥膜来维持土体稳定,泥浆性能需要根据地层条件和掘进要求而实时调配。将进出浆比重、黏度等参数做归一化处理,绘制图 17。不难发现,出浆参数和进浆参数的变化趋势较为一致,且其变化较进浆参数的变化略显迟滞。



(a) 泥浆比重



(b) 泥浆黏度

图 17 泥浆参数相关关系

Fig. 17 Relationship between unit weight of slurry and its viscosity

注浆参数中注浆压力与注浆量的设定相对独立,关联性较弱。由于同步注浆、隧洞内加强注浆和地表跟踪注浆等措施的参数选取合理、施作时间衔接紧密,路基的工后沉降在多重措施综合作用下,得到了有效的控制。

### 3.3 施工关键参数对路基沉降影响

由上述分析结果,除泥水压力外,将顶推力和泥浆比重、泥浆黏度也作为施工关键参数加以讨论。现对 Y6 测点沉降和施工关键参数分别做归一化处理并对数据曲线进行多项式拟合,绘制图 18,以更加直观清晰地识别参数变化趋势和时间顺序,评价参数变化对路基沉降的影响。

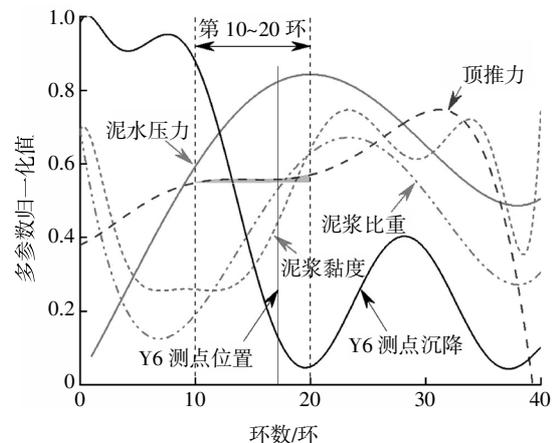


图 18 施工参数与路基沉降关系

Fig. 18 Relationship between construction parameters and settlement of embankment

从图 18 中不难看出,在盾构经过 Y6 测点位置

前后的第10~20环,Y6测点沉降速率较大,顶推力的变化较小,但此时泥水压力、泥浆比重和黏度的逐步提高,使Y6测点的沉降得到了明显的抑制.印证了泥水盾构是通过调控泥水压力和泥浆物理性能维持开挖面的稳定<sup>[18]</sup>.

泥水压力的提高加快了泥浆颗粒渗透、填充地层的速度;泥浆的比重较高说明了其中含有较多的颗粒,渗透、填充地层的能力较强;而泥浆的黏度较高则能够充分保证颗粒间的黏结性.由此看来泥水压力和泥浆物理性能的提高,缩短了泥浆成膜的时间,维持了开挖面的稳定.

## 4 结论

结合京沈客专望京隧道泥水盾构双洞下穿北京地铁挡墙式路基段的工程实例,采用现场监测手段,分析了泥水盾构施工参数变化、地表及隧洞内注浆对既有路基沉降的影响规律以及控制方法,得到如下结论:

1)双洞隧道先后穿越施工对路基沉降的影响规律较为一致.结合沉降监测数据,动态调整盾构施工参数,综合运用地表预注浆、地表跟踪注浆、隧洞内加强注浆等注浆措施,可有效地控制路基沉降.

2)盾构施工参数需根据沉降监测数据实时调整,在减小地层扰动、维持开挖面稳定的前提下快速通过穿越段.盾构掘进应保持较高的顶推力和泥水压力、较小的刀盘转速,泥水压力调整幅度不大于0.005 MPa;进浆浆液应维持较高比重和黏度;同步注浆压力应大于同等埋深的泥水仓压力0.15~0.2 MPa,注浆量应为理论注浆量的2.5倍左右,浆液配比需合理确定以适度缩短浆液初凝时间.

3)地表预注浆通过加固CFG桩桩端和桩侧土,改良并适度抬升了地层,为穿越施工预留了条件.隧洞内加强注浆可充分遏制路基的工后沉降,宜选取快凝浆液,注浆压力及注浆速度建议为1.2 MPa、100 L/min,以提高注浆效率.地表跟踪注浆可根据沉降监测数据,实时灵活且及时有效地抑制乃至补偿路基沉降,注浆压力建议为1.2 MPa.

4)分析盾构施工参数与路基沉降的归一化数据,发现掘进各参数之间、泥浆各参数之间的关联密切;通过提高泥水压力和泥浆物理性能可确保开挖

面的稳定,抑制路基的沉降.

## 参考文献

- [1] 张凤龙. 复杂条件下铁路大直径泥水盾构施工综合技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2015:3—4.  
ZHANG F L. Comprehensive construction technology of railway large diameter slurry shield under complex conditions[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 3—4. (In Chinese)
- [2] 郭信君, 闵凡路, 钟小春, 等. 南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2154—2160.  
GUO X J, MIN F L, ZHONG X C, *et al.* Summaries of key technologies and difficulties in Nanjing Yangtze River tunnel project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2154—2160. (In Chinese)
- [3] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2074—2080.  
YUAN D J, YIN F, WANG H W, *et al.* Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2074—2080. (In Chinese)
- [4] 伍振志, 杨国祥, 杨林德, 等. 上海长江隧道过民房段地表变位预测及控制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 582—587.  
WU Z Z, YANG G X, YANG L D, *et al.* Prediction and control of ground movement of Shanghai Yangtze River tunneling across building areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 582—587. (In Chinese)
- [5] XIE X, YANG Y, JI M. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, China[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 51: 120—132.
- [6] 房倩, 王剑晨, 刘翔, 等. 超大直径泥水式盾构施工地层变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 120—125.  
FANG Q, WANG J C, LIU X, *et al.* Characteristics of ground deformation induced by large-diameter slurry shield construction [J]. Modern Tunneling Technology, 2017, 54(3): 120—125. (In Chinese)
- [7] 林存刚, 张忠苗, 吴世明, 等. 软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2583—2592.  
LIN C G, ZHANG Z M, WU S M, *et al.* Study of ground heave and subsidence induced by shield tunneling in soft ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2583—2592. (In Chinese)
- [8] 林存刚, 张忠苗, 吴世明, 等. 泥水盾构掘进参数对地面沉降影响实例研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 116—126.  
LIN C G, ZHANG Z M, WU S M, *et al.* Case study of slurry shield driving parameters' influences on ground surface settlements [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 116—126. (In Chinese)

- [9] 林存刚,吴世明,张忠苗,等. 泥水盾构隧道施工引起的地面沉降分析及预测[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(5): 25—32.  
LIN C G, WU S M, ZHANG Z M, *et al.* Analysis and prediction of ground settlements due to slurry shield tunneling in a river-crossing tunnel [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(5): 25—32. (In Chinese)
- [10] 张忠苗,林存刚,吴世明,等. 杭州庆春路过江隧道施工风险控制实例分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3471—3480.  
ZHANG Z M, LIN C G, WU S M, *et al.* Analysis of engineering projects of risk control in Hangzhou Qing-chun Road cross-river tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3471—3480. (In Chinese)
- [11] 张忠苗,林存刚,吴世明,等. 泥水盾构施工引起的地面固结沉降实例研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(3): 431—440.  
ZHANG Z M, LIN C G, WU S M, *et al.* Case study of ground surface consolidation settlements induced by slurry shield tunneling [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(3): 431—440. (In Chinese)
- [12] 吴世明,林存刚,张忠苗,等. 泥水盾构下穿堤防的风险分析及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1034—1042.  
WU S M, LIN C G, ZHANG Z M, *et al.* Risk analysis and control for slurry shield under-passing embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1034—1042. (In Chinese)
- [13] 周松,荣建,陈立生,等. 大直径泥水盾构下穿机场的施工控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 806—813.  
ZHOU S, RONG J, CHEN L S, *et al.* Construction control of large diameter slurry shield undercrossing airport [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 806—813. (In Chinese)
- [14] 梁浩,程池浩,廖少明,等. 泥水盾构穿越吹填土变形实测分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 848—852.  
LIANG H, CHENG C H, LIAO S M, *et al.* Measured deformation of dredger fill during slurry shield tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 848—852. (In Chinese)
- [15] MOONEY M A, GRASMICK J, KENNEALLY B, *et al.* The role of slurry TBM parameters on ground deformation: field results and computational modeling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 57: 257—264.
- [16] 谢雄耀,王强,齐勇,等. 圆砾泥岩复合地层泥水盾构下穿房屋沉降控制技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1591—1599.  
XIE X Y, WANG Q, QI Y, *et al.* Settlement control of slurry shield tunneling crossing adjacent buildings in mixed ground of round gravel and mudstone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1591—1599. (In Chinese)
- [17] 李承辉,贺少辉,刘夏冰. 粗粒径砂卵石地层中泥水平衡盾构下穿黄河掘进参数控制研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 147—152.  
LI C H, HE S H, LIU X B. Study on main parameters control of tunneling through the Yellow River by a slurry balance shield in sandy gravel stratum with some large-size grains [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 147—152. (In Chinese)
- [18] 袁大军,沈翔,刘学彦,等. 泥水盾构开挖面稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 24—37.  
YUAN D J, SHEN X, LIU X Y, *et al.* Research on excavation face stability of slurry shield tunneling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 24—37. (In Chinese)
- [19] 赵明华,毛韬,牛浩懿,等. 上硬下软地层盾构隧道开挖面极限支护力分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 103—109.  
ZHAO M H, MAO T, NIU H Y, *et al.* Analysis of limit supporting force of tunnel excavation face for shield machine in upper-hard lower-soft ground [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 103—109. (In Chinese)
- [20] 贺志军,陈运鹏,李得建,等. 纵向倾斜地表盾构隧道掌子面三维挤出破坏分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9): 128—136.  
HE Z J, CHEN Y P, LI D J, *et al.* Analysis on three-dimensional extrusion failure of shield tunnel face with longitudinal declined ground [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(9): 128—136. (In Chinese)
- [21] 张艳博,梁鹏,刘祥鑫,等. 基于多参量归一化的花岗岩巷道岩爆预测试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 96—104.  
ZHANG Y B, LIANG P, LIU X X, *et al.* An experimental study of predicting rockburst in granitic roadway based on multiparameter normalization [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 96—104. (In Chinese)
- [22] 张莹,蔡宗熙,冷永刚,等. 盾构机掘进参数的关联分析与地质特征识别[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(4): 476—480.  
ZHANG Y, CAI Z X, LENG Y G, *et al.* Correlative analysis of shield tunneling data and recognition of geologic features [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(4): 476—480. (In Chinese)