

# 管幕-箱涵下穿运营铁路线地层变形分析及控制技术

王 滕<sup>1</sup>,王秀英<sup>1</sup>,谭忠盛<sup>1</sup>,王永红<sup>1</sup>,武亮月<sup>1,2</sup>

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.中国铁路总公司 工程管理中心,北京 100844)

**摘 要:**基于管幕-箱涵顶进工法施工的数值仿真模型,对涵洞斜穿铁路线施工过程中的地层变形规律进行分析,提出采用“有线仪器导向,一次性跟管钻进法”技术和控制箱涵顶进轴线位置、顶进速度和顶进力等地层沉降控制措施,并对箱涵顶进过程中的地层沉降进行现场监测.结果表明:管棚的沉降主要发生在开挖面前段 10 m 范围内;管幕-箱涵施工过程中地层变形主要是由管棚和箱涵对土体的挤压扰动引起的;本文提出的地层沉降控制措施可将沉降控制在 15 mm 以内.

**关键词:**隧道工程;管幕;箱涵;运营铁路;地层变形;沉降控制

**中图分类号:**U45      **文献标志码:**A

## Analysis and control of ground deformation of pipe-roofing and box-culvert construction under railway line

WANG Teng<sup>1</sup>,WANG Xiuying<sup>1</sup>,TAN Zhongsheng<sup>1</sup>,  
WANG Yonghong<sup>1</sup>,WU Liangyue<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China;  
2.Engineering Management Center,China Railway Corporation, Beijing 100844,China)

**Abstract:**Based on the numerical simulation model of pipe-roofing and box-culvert jacking construction, strata deformation law is analyzed during the construction process of culvert obliquely crossing a railway. The measures of controlling strata settlement are proposed, including the technology of "guiding with cable equipment, drilling followed with pipe" and controlling the position, speed and force of culvert axis during box-culvert jacking. At the same time, field monitoring of strata subsidence during jacking construction is also conducted. The results show that the subsidence of pipe-roof mainly occurs within the distance of 10m before excavation face. The strata deformation during construction is mainly caused by the squeezing of pipe-roofing and box-culvert on soil. The measures proposed in this paper can control strata settlement within 15 mm.

**Keywords:**tunnel engineering; pipe-roofing; box-culvert; railway line in operation; ground deformation; settlement control

收稿日期:2016-04-11  
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2016YJS092);国家自然科学基金(51178026)  
Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016YJS092); National Natural Science Foundation of China (51178026)  
第一作者:王滕(1991—),男,山东滕州人,博士生.研究方向为隧道工程.email: tengwang91@163.com.  
引用格式:王滕,王秀英,谭忠盛,等.管幕-箱涵下穿运营铁路线地层变形分析及控制技术[J].北京交通大学学报,2017,41(3):84—89.  
WANG Teng,WANG Xiuying,TAN Zhongsheng,et al. Analysis and control of ground deformation of pipe-roofing and box-culvert construction under railway line[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3):84—89.(in Chinese)

随着城市地下空间的立体化发展,管幕-箱涵顶进工法因其在控制地层沉降方面的独特优势日益受到重视<sup>[1]</sup>.管幕-箱涵顶进法结合了管幕法和顶管法的优点,不必降低地下水和大范围开挖,可以有效控制地面沉降,减少对周边环境的影响,在城市浅埋立交通道建设中是一项极有发展前途的施工工法<sup>[2-3]</sup>.

国内外学者对管幕-箱涵顶进过程中地表的沉降情况做了大量研究.W.L.Tan<sup>[4]</sup>利用 FLAC 软件对管幕法进行二维数值分析,分析了不同管幕形状、钢管直径对沉降的影响,研究表明钢管幕可明显地抑制隧道的变形及相应的地表沉降,地表沉降比没有应用钢管幕情况下能减少 40%~50%.罗仁安等<sup>[5]</sup>研究了上海中环线虹许路-北虹路地下立交工程,该工程中管幕 80 根,直径 970 mm,壁厚 10 mm 带锁口的钢管,形成口字形管幕,管幕段长 126 m,箱涵为矩形双孔钢筋混凝土结构,双向 8 车道,结构外包尺寸 34 m×7.85 m,箱涵共 8 节,地质主要为灰色淤泥质粉质黏土和灰色淤泥质黏土,管幕上覆土厚度 4~5 m,实测的地表沉降最大值 40 mm.田家琳等<sup>[6]</sup>研究了北京首都国际机场地下滑行道工程,该工程采用 Φ325 mm×10 mm 螺旋钢管形成口字形管幕,管幕段长 148.3 m,箱涵为矩形框架双孔钢筋混凝土结构,结构外包尺寸 13.7 m×6.45 m,箱涵共 10 节,地质主要为黄褐色人工填土、亚黏土、黏土、粉砂及细砂,管幕上覆土厚度 2.5~6.9 m,实测的地表沉降最大值 29 mm.现有研究多为使用管幕-箱涵法修建隧道等地下工程,而对于斜穿铁路等工程的研究很少.实际上斜交箱涵的顶进面临着诸多技术难题,如既有线沉降的控制,箱涵顶进过程的偏斜问题等.

针对以上问题,本文作者以吉林北大沟污水管线斜穿铁路线及吉化管廊工程为依托,基于管幕-箱涵顶进工法施工数值仿真模型,分析了斜穿施工过程中的地层变形规律,并对箱涵顶进过程中的地层沉降进行现场监测,总结了管幕-箱涵在斜穿施工过程地层变形规律,并提出相应的沉降控制技术.

### 1 工程概况

北大沟污水管线防护涵工程是吉林市北大沟综合整治污水管线及泵房工程中的重点工程,防护涵内穿污水管线 1 条,管径 1.25 m,防护涵采用 C35 混凝土,净空宽 3 m,高 2.4 m.外轮廓宽 4.2 m,外轮廓高 3.8 m,抗渗等级 S8,防水等级为一级.防护涵在 K8+665 段下穿龙舒线和吉化管廊,方涵与铁路线斜交下穿.该处铁路线为曲线,曲线半径 400 m.方

涵顶面与路基面的垂直距离为 6.103 m,施工中采用管幕保护铁路线的安全运营,上部管幕与路基面的垂直距离为 4.023 m.在线路左侧路基坡角外 4 m 有吉化架空管廊与线路平行走向,涵洞从 2 个管廊基础间穿过,管廊基础为扩大基础,顶涵在基础下部通过,与每个基础脚有平面交叉,方涵上方管棚顶面与穿越管廊基础的最小垂直距离为 0.08 m.管廊廊架混凝土年久失修,多处风化剥落,并有裂纹,管廊上方有多条正在运行的管线.防护涵施工穿越的主要地层为粉质砂土、细砂和卵石,方涵顶面设计标高 183.877 m,该段地下水稳定水位在 185.897 m 标高处,细砂渗透系数 0.1~0.2 m/d.防护涵与线路等的位置关系如图 1 和图 2 所示.图 1 中,数字 1~4 代表实际测点 1~4 的位置.

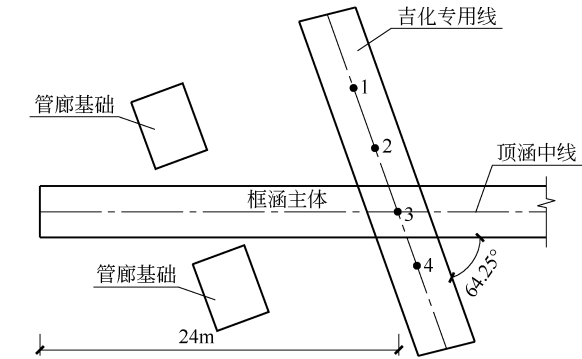


图 1 防护涵与铁路线及管廊的平面位置关系

Fig.1 Plane positional relation of protection culvert, railway line and pipe gallery

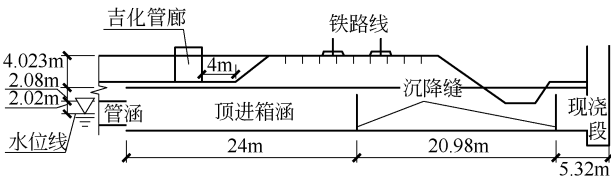


图 2 防护涵与铁路线及管廊的立面位置关系

Fig.2 Vertical positional relation of protection culvert, railway line and pipe gallery

施工中管幕布置如图 3 所示,采用 D194 大管棚和 D50 小钢管形成管幕,管幕长 44 m,箱涵分为 2 节,如图 2 所示.本工程的铁路线位于半径 400 m 的曲线上,对路基面和轨面沉降的控制要求更为严格.另外,本工程周围管线、管廊基础较复杂,尤其是吉化专用线一侧管廊,输送的全部是化学气体,管廊不仅年代较长,而且与箱涵的平面和垂直距离都很小,若施工造成管廊基础位移过大,将会对上部管廊造成严重影响.因此需要研究箱涵顶进过程地层变形规律,并采取切实有效的地层变形控制措施.

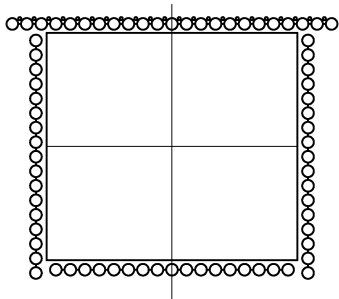


图 3 管幕超前支护布置图

Fig.3 Arrangement of pipe-roofing advance support

2 箱涵顶进过程地层变形分析

2.1 计算模型及参数

采用 MIDAS/GTS 建立如图 4 所示的数值模型,模型宽 30 m,高 15 m,管涵纵向深度 50.3 m,土体采用实体模型,箱涵采用板壳模型,管棚采用梁模型.模型四周采用水平约束,底部采用竖直约束.参数根据现场土工试验选取,见表 1.

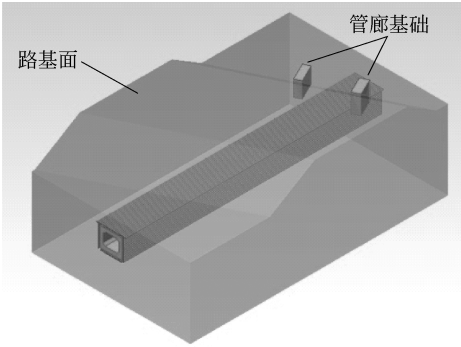


图 4 仿真模型

Fig.4 Simulation model

表 1 地层物理力学参数表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of ground

地层	$E / \text{MPa}$	$\mu$	$\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	$c / \text{kPa}$	$\Phi / (^{\circ})$	$K / (\text{MPa}/\text{m})$
粉质黏土	17.8	0.30	19.6	24	30	35
细砂	19.0	0.27	20.0	0	25	40
卵石	80.0	0.18	21.5	0	50	42

管幕上方既有铁路线荷载和列车荷载参照规范计算得到,分别为 33 kPa 和 54 kPa<sup>[7]</sup>.

2.2 计算结果分析

2.2.1 箱涵顶进过程管幕沉降

图 5 给出了上部管幕随箱涵顶进开挖过程的沉降情况.随着箱涵的推进,管幕的最大挠度不断前移,挠度在不断增加.

图 6 给出开挖过程中铁路线正下方管幕位移情况.从管幕位移规律来看,由于箱涵顶进时土体的开挖,引起开挖面前段的管棚相对下沉,0~24 m 为开挖后箱涵跟进段,所以管棚竖向位移很小,而 24~

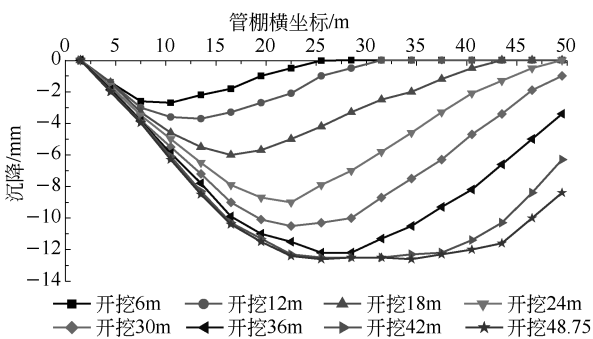


图 5 开挖过程中管幕沉降情况

Fig.5 Settlements of pipe-roof during excavation process

40 m 为开挖未顶进段和前方受扰动段,所以管棚竖向位移较大,该段管棚最大沉降值接近 12 mm.由于箱涵的支护刚度大,而开挖扰动区土体的支护刚度较小,所以管棚竖向位移曲线左侧陡右侧平缓.管幕变形具有连续性,在开挖前端管幕下沉的同时,箱涵上部及开挖面前 20 m 左右管幕略有向上隆起.这一规律正体现了管幕的卸载作用,管幕对土体有加固和支承的作用,箱涵前端约 1 倍洞径的范围为主要的松动区域,相应上部管幕段的承载率可达 30%<sup>[8-9]</sup>.

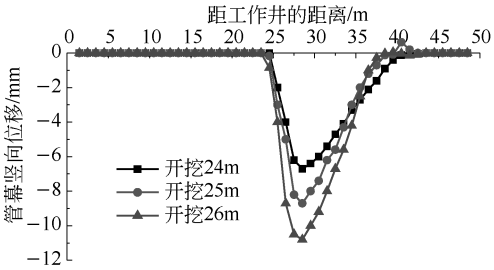


图 6 不同工况情况下管棚竖向位移

Fig.6 Vertical displacements of pipe-roofing in different cases

2.2.2 箱涵顶进过程地表沉降

箱涵顶进开挖过程中,沿箱涵轴线方向地表最大沉降值和分步相对沉降统计见表 2.

由表 2 可见,全部顶进过程中的最终沉降值为 18.38 mm.在顶进过程中,当箱涵顶进约 6 m 和 24 m 时分步沉降最大,分别为 5.72 mm 和 6.08 mm,占全部施工步骤的 31.1%和 33.1%.这是由于在涵洞 6 m 处上部为吉化管廊,24 m 处上部为铁路线,这 2 处的上部荷载较其他位置大,所以管棚的竖向位移也相对较大.箱涵顶进过程的数值仿真表明,箱涵顶进引起地基沉降占主要成分,箱涵顶进前 24 m 时沉降增长较快,箱涵顶进 24~30 m 时沉降增长较缓,箱涵顶进 30 m 以后沉降趋于稳定.可见沉降主要发生在前 24 m 顶进段,因此前 24 m 顶进段

是沉降控制的关键环节。

表 2 顶进施工过程中沿箱涵轴线方向  
地表最大沉降统计表

Tab.2 Statistics of the maximum ground settlement along  
culvert axis during jacking construction

施工进度	累计沉降 值/mm	累计沉降 百分比/%	分部沉降 值/mm	分部沉降 百分比/%
开始施工	0	0	0	0
顶进 6 m	- 5.72	31.1	-5.72	31.1
顶进 12 m	- 7.08	38.5	-1.36	7.4
顶进 18 m	- 9.66	52.6	-2.58	14.0
顶进 24 m	-15.74	85.6	-6.08	33.1
顶进 30 m	-17.17	93.4	-1.43	7.8
顶进 36 m	-18.12	98.6	-0.95	5.2
顶进 42 m	-18.36	99.9	-0.24	1.3
顶进 48.75 m	-18.38	100.0	-0.02	0.1

2.2.3 箱涵顶进过程掌子面前方地层变形

箱涵顶进施工过程中管幕的沉降源于开挖面前方土体的松动变形,图 7 给出了开挖 26 m 时开挖面前方土体地层变形情况,由图可见,开挖面前方一定范围土体发生了松动变形,并导致开挖面发生挤出变形。

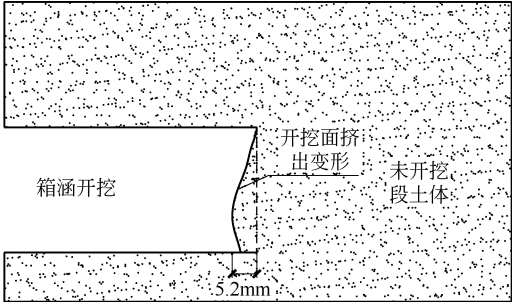


图 7 开挖 26 m 时开挖面前方地层变形情况  
Fig.7 Ground deformation before excavation  
face with excavation length of 26 m

图 8 和图 9 给出了管幕下不同深度土体在不同工况下的水平位移,可见,随着开挖的进行,箱涵前端土体水平位移增加,土体的松动范围逐渐扩大,管幕下不同深度土体松动范围在 0~5 m 范围,符合箱涵顶进情况下掌子面前方扰动范围的推测<sup>[10-11]</sup>。

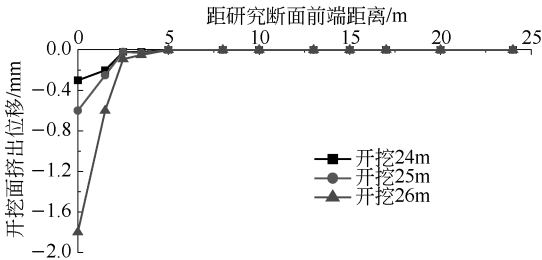


图 8 管幕下 0.5 m 土体水平位移

Fig.8 Soil horizontal displacement under  
pipe-roofing in depth of 0.5 m

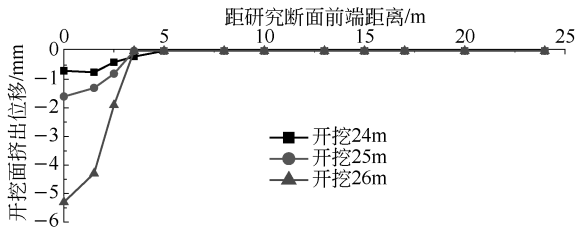


图 9 管幕下 1.75 m 土体水平位移

Fig.9 Soil horizontal displacement under  
pipe-roofing in depth of 1.75 m

3 管幕-箱涵顶进沉降控制技术

3.1 管幕-箱涵顶进施工地层变形

在管幕-箱涵顶进工程中,主要的控制因素为地表沉降,目前对于管幕变形量大小的控制并无统一的标准,一般取管幕的容许变形量 $[\delta]=5\text{ mm}$ ,工程实践表明,在一般情况下,管幕变形量小于 5 mm 时,地表沉降可控制在 20 mm 内<sup>[12-13]</sup>。通过对管幕-箱涵施工具体工程的调研及计算分析,发现施工对地表变形的影响主要分 2 个阶段:①钢管幕顶进阶段;②箱涵顶进阶段,其中箱涵顶进阶段引起的地表变形比例更大。

钢管幕顶进阶段引起地表变形的基本原因为:

- ①开挖面土体的移动;
  - ②土体挤入机头尾部空隙;
  - ③土体与钢管的相互作用;
  - ④纠偏;
  - ⑤受扰动土体的再固结,尤其是在饱和软土地层中。
- 箱涵顶进阶段引起地表变形的基本原因为:①地下水排出;②网格挤土或开挖;③泥浆套的形成情况及注浆压力。

3.2 地层沉降控制技术研究

结合以上分析,本工程在地层沉降控制方面主要进行以下工作。

1)采用“有线仪器导向,一次性跟管钻进法”技术,即成孔和埋设管棚一次完成,尽可能减少管幕施工引起的地表沉降。图 10 为管棚中安设的能准确测定钻头在地下的位置和方向的探棒。



图 10 管棚中的探棒

Fig.10 Probe in the pipe

2)控制箱涵顶进轴线位置.箱体预制成型后,当箱涵主体强度达到设计强度 100%后,方可进行正式顶进作业,顶进时保持各行顶柱与顶镐顶力线安装成一条直线,并与后背梁垂直.顶柱、顶镐的横断面要与后背梁、预制箱体接缝横断面平行一致并密贴.箱涵顶进过程中,要进行测量严格控制顶进方向,每顶一镐必须进行方向和标高测量,测出箱体前、后、左、右偏差数据,根据测量数据提出调整方法.

3)控制箱涵顶进速度和顶进力,保证开挖面的稳定性.根据箱涵的顶进速度和开挖出土速度,有欠开挖、静止和超开挖 3 种情况,计算分析表明<sup>[14-15]</sup>,箱涵推进速度的快慢直接影响着正面阻力的大小,箱涵以较慢的速度推进时所受的推进阻力最小,如图 11 所示.因而,从对箱涵施加推力大小的角度考虑,以较慢的速度推进箱涵是最为合理的,实际测得的最大总推力为 13 MPa,符合欠开挖模式.

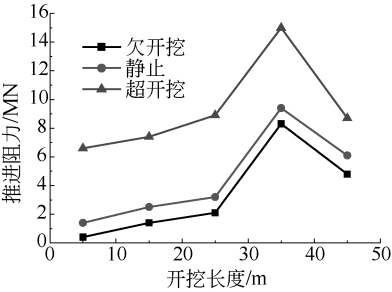


图 11 计算得到的推进阻力曲线

Fig.11 Curves of calculated propelling resistance

在实际施工中,严格掌握挖土量,底板和侧刃角必须吃土顶进,挖土坡面不陡于 60°.根据开挖面地层变形规律,挖土时先挖两侧,后挖中间,形成向洞内凸入弧形,确保路基不发生塌方,保证运行安全,待箱体就位,一次挖净.

3.3 本工程沉降控制效果

对施工进行全过程监测,依靠监控数据指导施工,密切注意监测值的变化情况,当出现异常时,及时分析,采取措施处理.箱涵顶进完成后,立即在箱涵与管幕间压注固化泥浆材料,使得箱涵与管幕之间的触变泥浆及时固化,以减小地表后期沉降.图 12 给出了实际监测到的箱涵顶进过程铁道沿线地表监测点沉降情况,其中监测点布置如图 1 所示.

图 12 中横座标 1 对应 9 月 19 日开始正式顶进,顶进 1 m;2 对应 9 月 22 日,顶进 3 m,顶程达到 11 m;3 对应 9 月 25 日,顶进 1 m,顶程达到 19 m,后节箱涵跟上;4 对应 9 月 29 日,顶进 2 m,顶程达到 30.5 m;5 对应 10 月 5 日,顶进 4 m,顶程达到

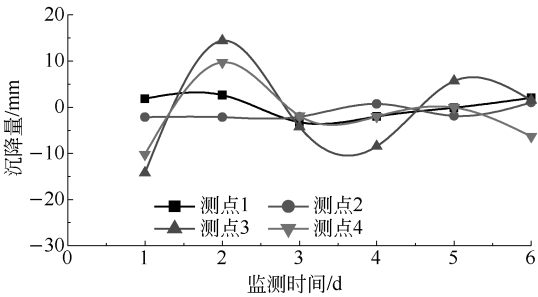


图 12 箱涵顶进过程铁道沿线地表监测点沉降

Fig.12 Ground surface settlement of the monitoring points along rail line during box-culvert jacking

41 m;6 对应 10 月 9 日,后节涵顶进到位.

由图可见,箱涵顶进过程沿铁轨沿线地表沉降控制在 15 mm 以内,箱涵中轴线上路基沉降值较大,离箱涵中轴线越远监测点沉降越小.箱涵顶进会引起沿铁路线路方向的沉降差,施工中应根据这些监测信息及时配合铁路工务的起道,保证列车运行的安全.

4 结论

本文结合实际工程进行了管幕—箱涵顶进施工过程地层变形规律分析,得到以下主要结论.

1)由于箱涵顶进时土体的开挖,开挖面前段管棚相对下沉,主要发生在开挖面前方 10 m 的范围内,箱涵上部及开挖面前 20 m 左右管幕略有向上隆起,这一规律正体现了管幕的卸载作用.

2)箱涵顶进前 24 m 时沉降增长较快,24~30 m 时沉降增长较缓,箱涵顶进 30 m 后沉降趋于稳定.可见沉降主要发生在前 24 m 顶进段,因此前 24 m 顶进段是沉降控制的关键环节.箱涵顶进开挖过程中,管幕下不同深度土体松动范围是 0~5 m.

3)施工对地表变形的影响主要分钢管幕顶进阶段和箱涵顶进阶段,其中箱涵顶进阶段引起的地表变形比例更大.

4)为了控制施工过程的地表沉降,应提高管幕施作精准程度,控制箱涵顶进轴线位置、顶进速度和顶进力以保证开挖面的稳定性,加强沉降监测,进行信息化施工.

参考文献 (References):

[1] 杜朝伟,倪鲁肃,谭忠盛. 明挖法下穿铁路大跨斜交箱涵稳定性分析[J]. 北京交通大学学报,2010,34(4): 41—44.  
DU Chaowei, NI Lusu, TAN Zhongsheng. Stability analysis of long-span skew box culvert under pass railway with open cut method[J]. Journal of Beijing Jiaotong U-

- iversity, 2010, 34(4):41—44. (in Chinese)
- [2] 杨慧林.北京地区采用新管幕工法修建深埋地铁暗挖车站方案初探[J].铁道标准设计,2012(12):72—77.  
YANG Huilin. Preliminary research on new tubular roof method used for deeply buried underground excavation metro station in Beijing area [J]. Railway Standard Design, 2012(12):72—77. (in Chinese)
- [3] 李兴高,袁大军,周江天,等.超长管幕在浅埋暗挖隧道下穿机场跑道施工中的应用[J].铁道建筑,2014(2):67—69.  
LI Xinggao, YUAN Dajun, ZHOU Jiangtian, et al. The application of long pipe-roofing under the airport runway in the shallow buried tunnel[J]. Railway Engineering, 2014(2):67—69. (in Chinese)
- [4] TAN W L, RANJITH P G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunnelling[C]//16th ASCE Engineering Mechanics Conference. Seattle, USA, 2003: 1—10.
- [5] 罗仁安,姜洋标,万敏.管幕箱涵顶进施工中地表变形监测及有限元模拟[J].上海大学学报(自然科学版),2009,15(5):534—540.  
LUO Ren'an, JIANG Yangbiao, WAN Min. Ground surface deformation in construction of box jacking with pipe roof and three-dimensional finite element method simulation[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2009, 15(5):534—540. (in Chinese)
- [6] 田家琳,李征,刘秀娟.首都国际机场上穿滑行道长大箱涵顶进施工技术[J].铁道标准设计,2007(3):51—53.  
TIAN Jialin, LI Zheng, LIU Xiujuan. The long and large box culvert jacking technology under the taxiway of the capital international airport[J]. Railway Standard Design, 2007(3): 51—53. (in Chinese)
- [7] 王秀英,谭忠盛,武亮月,等.北大沟污水管线防护涵下穿铁路线顶进施工技术[R].北京:北京交通大学,2013.  
WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, WU Liangyue, et al. Jacking construction technology of Beidagou sewage pipeline protection culvert under through railway[R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [8] 孙均,虞兴福,孙昊,等.超大型“管幕-箱涵”顶进施工土体变形的分析与预测[J].岩土力学,2006,27(7):1021—1027.  
SU Jun, YU Xingfu, SUN Hao, et al. Analysis and prediction on soft ground deformation of a super-large shallow buried "pipe-roofing and box-culvert" jacking project under construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7):1021—1027. (in Chinese)
- [9] 林敏,张平之.铁路顶管施工中路面沉降的研究[J].北京交通大学学报,2001,25(4):69—72.  
LIN Min, ZHANG Pingzhi. Study on ground movement from pipe-jacking in railway roadbed[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2001, 25(4):69—72. (in Chinese)
- [10] 万敏,白云,陈文财.管幕箱涵顶进施工中迎面土压力研究[J].岩石力学与工程学报,2007,40(6):59—63.  
WAN Min, BAI Yun, CHEN Wencai. A study on the front earth pressure during box culvert jacking within pipe-roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 40(6):59—63. (in Chinese)
- [11] 李向阳,闫治国,朱合华,等.软土地层管幕法隧道箱涵顶进开挖数值模拟[C]//全国城市地下空间学术交流会论文集,2004:688—691.  
LI Xiangyang, YAN Zhiguo, ZHU Hehua, et al. Excavation numerical simulation of culvert box advanced in pipe-roof in saturated soft soil Layer[C]//Academic Seminar on the National Urban Underground Space, 2004:688—691. (in Chinese)
- [12] 沈桂平,曹文宏,杨俊龙,等.管幕法综述[J].矿产勘查,2006,9(2):27—29.  
SHEN Guiping, CAO Wenhong, YANG Junlong, et al. Review of pipe-roof method[J]. Mineral Exploration, 2006, 9(2):27—29. (in Chinese)
- [13] 刘博海,杨亮,罗昊冲.管幕法简述[J].城市道桥与防洪,2011(5):141—143.  
LIU Bohai, YANG Liang, LUO Haochong. Brief description of pipe-roof method[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2011(5):141—143. (in Chinese)
- [14] 费伟.大断面箱涵顶力分析与姿态反馈控制技术研究[D].上海:同济大学,2008.  
FEI Wei. Research of jacking force analysis of large cross section box culvert and control technology of the attitude feedback [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [15] 周顺华,廖全燕,刘建国,等.矩形顶管隧道顶进过程的地层损失[J].岩石力学与工程学报,2001,20(3):342—345.  
ZHOU Shunhua, LIAO Quanyan, LIU Jianguo, et al. Stratum loss during pipe jacking of rectangle tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 342—345. (in Chinese)