

地铁隧道变形控制门架式保护方案研究

彭 琦

(深圳市市政设计研究院有限公司, 518029, 深圳//高级工程师)

摘 要 临近地铁沿线的工程施工,尤其是地铁隧道上部土体的开挖卸荷作用,会对下方的隧道结构产生较大影响。以深圳市前海市政工程双界河水廊道工程为例,运用数值模拟方法,对比分析了门架式保护方案、注浆加固方案和未加固方案下地铁隧道的变形,发现门架式保护方案对地铁隧道的隆起变形可以减少 37%。经与现场监测数据对比,地铁隧道现场监测结果与数值模拟结果较吻合,门架式保护方案能够有效减小隧道隆起变形。

关键词 地铁;隧道;变形控制;门架式保护方案

中图分类号 U456.3⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.051

Research on Door Frame Protection Scheme for Metro Tunnel Deformation Control

PENG Qi

Abstract The construction project close to metro line, especially the metro tunnel upper soil excavation unloading effect, will have a greater impact on the tunnel structure below. Taking the project of Shenzhen Qianhai municipal engineering Shuangjie River corridor project as example, using numerical analysis method, metro tunnel deformation conditions in door frame protection scheme, grouting reinforcement scheme and unenforced scheme are comparatively analyzed. The results show that the lifting deformation can be reduced by 37% in door frame protection scheme. After comparing to field monitored data, it is discovered that the actual metro tunnel deformation result is consistent with the results of numerical simulation results, and the door frame protection scheme can effectively reduce the tunnel lifting deformation.

Key words metro; tunnel; deformation control; door frame protection scheme

Author's address Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., 518029, Shenzhen, China

临近地铁的工程项目施工,不可避免地会对已建地铁结构设施的安全和运营产生影响^[1-5]。在地铁隧道上方开挖基坑,开挖卸荷引起坑底地层回弹变形,亦会造成下方地铁隧道结构的隆起变形。大

面积的基坑开挖引起隧道隆起变形现象更加突出,一方面因为基坑开挖带来的大范围卸荷,引起地层和隧道产生较大隆起变形;另一方面会造成基坑底部地层扰动,地层力学指标降低,加剧隆起变形。目前,研究主要集中在理论分析、数值模拟计算和工程措施等方面。文献[6-8]采用数值模拟方法,对基坑开挖引起临近既有隧道变形的影响规律、影响因素等进行了系统研究,并提出了改进计算方法,提高了计算的准确度;文献[9-10]结合具体工程案例,针对既有地铁隧道正上方基坑开挖引起的变形控制措施进行了深入分析。一般而言,分段、分层、分步开挖,减小卸荷面积和强度,加固隧道上方土体等措施可有效减小下方隧道的隆起变形。对于地层条件差、开挖深度深、基坑底部与隧道间的夹土厚度薄、隧道隆起变形控制难度高的情况,地铁隧道门架式保护方案是有效的控制措施^[10]。

本文以深圳市前海市政工程双界河水廊道工程为例,采用数值模拟、现场监测等方法,系统地分析了地铁隧道门架式保护方案在工程中的运用,以期同类工程提供参考。

1 工程概况

双界河水廊道工程位于深圳市前海合作区,该工程的实施实现了河道防洪、水质提升、生态景观建设等目标。双界河水廊道工程将现状双界河主槽向南偏移 35 m,主槽宽度为 30 ~ 35 m,堤距为 155 ~ 263 m,主槽开挖段地面平均高程为 4.33 m,地下水平均高程约 1.58 m,平均开挖深度约 6.70 m。已建深圳地铁 1 号线(以下简为“1 号线”)、5 号线,前海车辆段左、右出入线,11 号线与双界河水廊道存在交叉关系,见图 1。交叉区段内 1 号线隧道顶板高程约 -8.0 m,5 号线隧道顶板的平均高程约 -6.3 m,11 号线隧道顶板高程约 -11.0 m。双界河水廊道工程部分开挖区段位于地铁隧道结构的正上方,位置敏感,工程难度和风险较大^[11]。



图1 双界河水廊道工程与地铁线路平面位置关系图

Fig. 1 Location relation plan of Shuangjie River corridor project and metro line

双界河水廊道工程场地内自上而下分布的岩土层如下:①杂填土,局部分布,层厚约3.20 m;②填石层,以块石为主,其间隙充填砾质黏性土、砂土或碎石土,平均厚度约5.17 m;③软土,其性质基本上同滨海相淤泥,平均厚度约3.5 m,原位十字板剪切试验强度平均值为8.9 kPa;④淤泥质土,局部分布,平均厚度为1.87 m,标贯平均击数为4.5击;⑤残积土层,场地内分布广泛、连续,为花岗岩风化残积而成,平均厚度为5.46 m,标贯平均击数为14.3击;⑥下伏基岩地层,分布广泛且连续稳定,基岩多已风化为全风化岩、强风化岩、弱风化岩和微风化岩,风化较强烈,风化带较厚^[11]。

地铁隧道主要位于淤泥质土和残积土层中。

2 地铁隧道门架式保护设计方案

1号线、5号线及前海车辆段左出入线同本工程水廊道平面上存在交叉关系,交叉段开挖深度为3~7 m。

地铁隧道采用盾构法施工,管片直径为6.0 m,厚0.3 m。地铁隧道采用门架式结构的整体保护方案。如图2~3所示,以1号线保护区段为例,地铁隧道两侧打设截水旋喷桩。旋喷桩桩径为800 mm,桩间距为650 mm,桩长为6 m;实施井点降水,井深11 m。本工程实施分期、分段施工,分段长度为10 m。首先进行第1层土体开挖,再放坡开挖第2层土体至标高1.0 m上,形成临时施工平台;在两隧道两侧3.5 m范围外共打设3排钻孔灌注桩(桩顶标

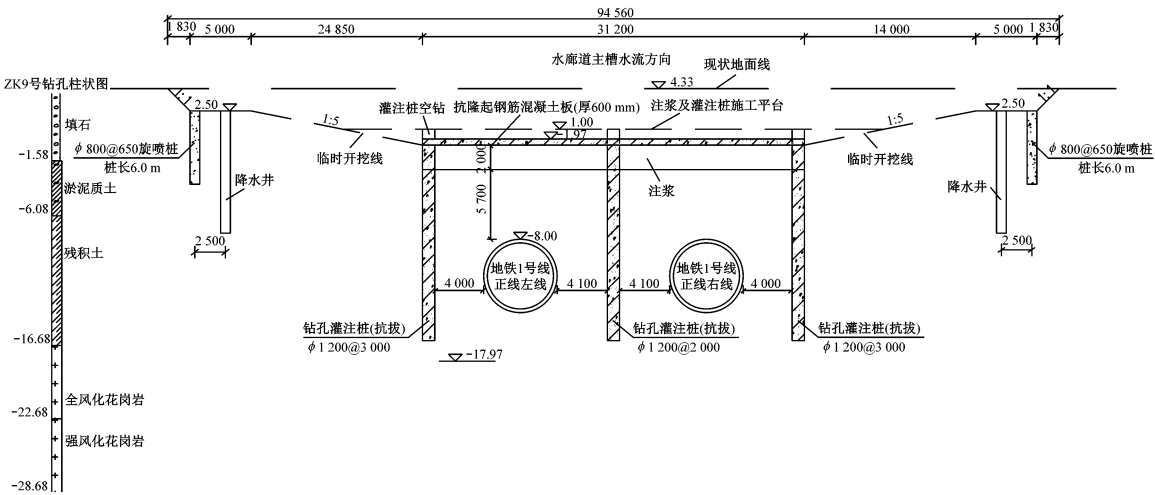
高约-2.0 m),灌注桩桩径为1.2 m、间距为4 m、桩长为16 m,桩体起抗拔作用;对标高-2.0 m以下隧道上部土体进行注浆加固;放坡开挖至主槽底设计标高(约为-2.0 m)处时,在灌注桩桩顶浇筑钢筋混凝土盖板,灌注桩与盖板浇筑固结,形成门架式结构,以减小隆起变形;最后进行大范围的平层开挖,完成双界河水廊道断面范围内的土体开挖^[11]。

3 地铁隧道门架式保护方案数值分析

为了全面分析双界河水廊道工程土方施工对地铁隧道结构的影响,以1号线保护区段为例,采用数值模拟方法,分别对门架式护方案、注浆加固保护方案和不采取加固保护方案等3种方案下地铁隧道和岩土体的应力、变形进行了模拟,并对对比分析了地铁隧道变形及其分布特征。

3.1 基坑开挖流程

门架式加固保护方案、注浆加固保护方案和未采取加固保护方案3种方案下土层开挖都为由高到低逐层开挖。为了保证对比分析的可靠性,3种方案的分级逐层开挖方式都一致,仅在具体加固保护步骤不同。根据实际的施工步骤,首先进行第1层土的开挖,土体厚约1.5 m;再放坡开挖第2层土,第2层土开挖完成后,根据门架式加固保护方案需进行注浆和抗拔桩施工;而后进行基坑下层土体的放坡开挖,最后进行平层开挖至设计高程。每次开挖步完成后,进行收敛计算来模拟该开挖过程土体的应力释放和变形过程,然后进入下一个开挖步



注:除标高以 m 计外,其余单位均为 mm,图3 同。
图 2 地铁隧道门架式保护结构横断面

Fig. 2 Cross-section of metro tunnel door frame protection scheme

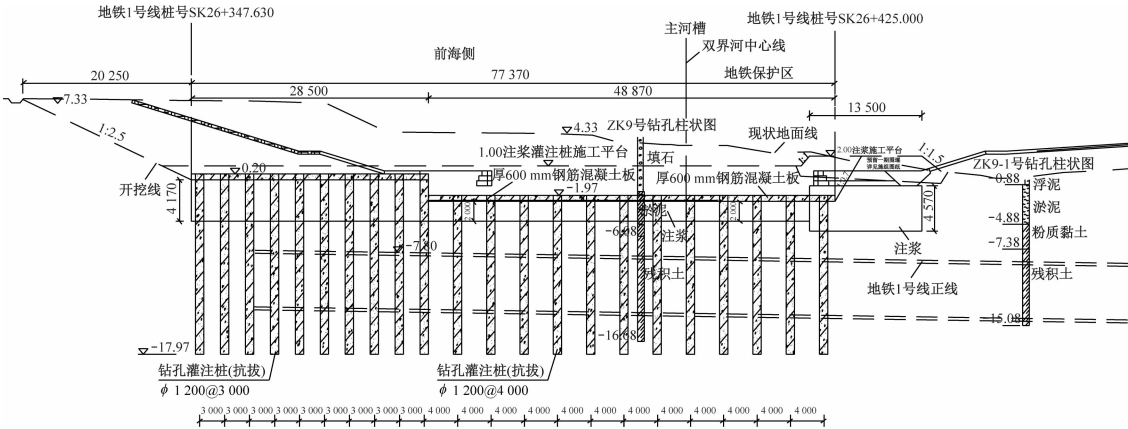


图 3 地铁隧道门架式保护结构纵断面

Fig. 3 Profile-section of metro tunnel door protection structure

计算^[12-14]。

3.2 模型的建立

以 1 号线保护区段为例,采用 FLAC3D 岩土数

值计算软件对模型进行计算分析。岩土体物理力学参数参考地勘资料和《工程地质手册》,并结合工程经验选取,见表 1。

表 1 1 号线保护区段岩土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of Line 1 protection section rock and soil

名称	体积质量/ (g/cm ³)	变形模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/ (cm/s)
填土层	18.7	15	0.30	12.0	16	3.0×10 ⁻⁴
填石	22.0	100	0.15	0.1	35	3.0×10 ⁻²
淤泥	15.7	5~10	0.40	10.0	6	1.0×10 ⁻⁶
残积土	18.5	120	0.25	20.0	22	4.0×10 ⁻⁴
全风化花岗岩	19.5	250	0.25	24.0	25	2.5×10 ⁻⁵
强风化花岗岩	19.8	350	0.20	35.0	35	6.0×10 ⁻⁴

土体开挖的降水过程通过 model flnull 单元来实现,抗拔桩通过 FLAC3D 自带的 pile 单元来模拟;隧道盾构管片和盖板结构通过实体单元来模拟,弹性模量取 25 GPa。模型边界采用法向位移约束,地面为自由面。在基坑开挖过程加载模拟中,岩土体均采用弹塑性本构模型 Mohr-Coulomb 屈服准则。

以门架式保护方案为例,整个数值模拟流程可以分为以下 5 个步骤:① 建立 1 号线隧道结构模型,并进行开挖施工;② 双界河水廊道浅层第 1 层土的开挖;③ 双界河水廊道浅层第 2 层土的开挖;④ 门架式结构施工与土体开挖;⑤ 完成双界河水廊道开挖和支护工程。

3.3 基坑开挖过程数值模拟分析

以门架式保护方案模拟为例,建立 1 号线隧道结构模型,再按照实际施工流程进行双界河水廊道基坑开挖施工模拟。

3.3.1 基坑浅层土体开挖模拟

双界河水廊道浅层(第 1~2 层)土体开挖至注浆施工平台,开挖土体厚约 3.33 m。开挖前,先降水后开挖。开挖时,首先进行平层开挖,然后进行放坡开挖,开挖土体主要为填石。基坑底板距离隧道结构约 7 m,且此阶段土体开挖未采取加固措施。通过模拟分析,基坑底板的回弹变形为 10.63 mm,引起的隧道结构的最大隆起变形为 7.45 mm。

3.3.2 门架式结构施工和基坑土体开挖模拟

开挖至注浆施工平台后,进行隧道上部土层的注浆加固和抗拔桩的施工;开挖至盖板处后,再进行盖板的施工。该施工步完成后隧道结构的隆起变形为 9.40 mm。

3.3.3 基坑大范围平层土体开挖模拟

大范围平层开挖为基坑土体开挖的最后一个施工步,此阶段需进行基坑两侧放坡坡体的大范围开挖卸荷施工。基坑土体开挖完成后,隧道结构的累积隆起变形为 9.86 mm。这得益于平层土体开挖卸荷引起的隧道结构变形本身就较小,以及门架式结构和注浆土体的抗隆起变形能力。

3.3.4 抗拔桩加长前后对比分析

门架式加固保护方案设计桩长为 19 m;而对比方案中拟增加桩长 5 m,桩长达到 24 m。对两种桩长下地铁隧道的隆起变形进行了比较分析。增加桩长后,地铁隧道结构的最终变形为 9.48 mm,相比未增加桩长时减小了约 0.38 mm,效果不明显,综合

效益不高。

3.4 地铁隧道保护方案对比分析

图 4 为 3 种方案下地铁隧道隆起变形对比。主要表现的现象和特征有:

1) 采用加固措施后,地铁隧道隆起得到了抑制,变形明显减小,尤其是采用门架式加固保护方案后,地铁隧道隆起变形控制在 10 mm 以内,满足地铁保护区的要求。

2) 相比另外两种方案,门架式加固保护方案实施后,地铁隧道及临近岩土体隆起变形明显比两侧变形小。说明该方案有效减小了地层和隧道的变形,验证了方案的有效性和合理性。

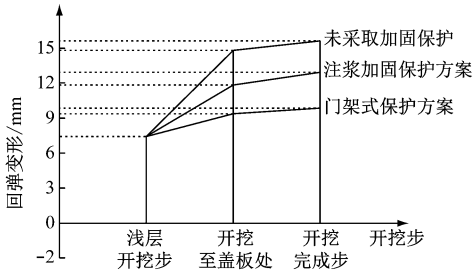
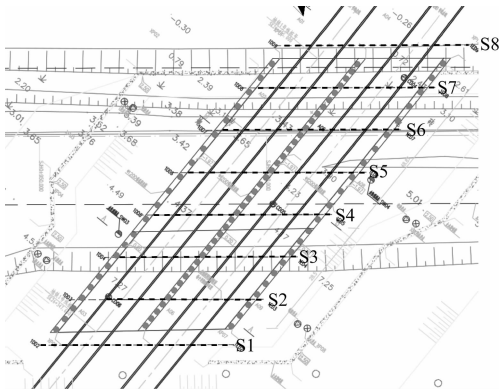


图 4 3 种施工方案下地铁隧道隆起变形对比图

Fig. 4 Comparison of metro tunnel lifting deformation in three construction schemes

4 地铁隧道现场监测与数值模拟对比分析

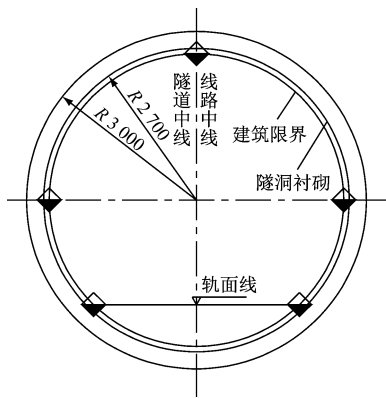
为实时监测基坑开挖时地铁隧道结构的变形,获取隧道结构的安全状况,在隧道内进行了自动化监测,主要对开挖影响区域内进行了断面变形监测。1 号线保护区段监测平面布置和监测断面测点布置见图 5~6,每条隧道每 10 m 布置 1 个监测断面,每个监测断面布置 5 个监测点。



注:S1—S8 为监测断面。

图 5 1 号线保护区段监测平面布置图

Fig. 5 Layout of Line 1 protection section monitoring plan



注:R 为曲线半径,单位为 mm。

图6 1 号线保护区段隧道断面测点布置图

Fig. 6 Layout of measuring points of Line 1 protection section tunnel

采取门架式加固保护方案后,对图 7 和表 2 中地铁隧道的现场监测结果和数值模拟结果对比发现,其数值模拟结果与现场监测结果吻合度较高。

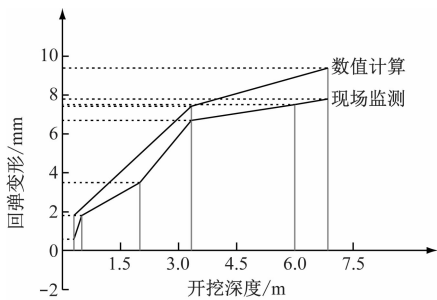


图7 地铁隧道拱顶隆起现场监测数据与数值计算数据对比图

Fig. 7 Comparison of metro tunnel field monitored data and numerical calculation data

基坑浅层土体开挖过程中,由于卸荷范围和卸荷强度较大,且对下方隧道未采取相关的加固保护措施,该阶段地铁隧道隆起变形较大;进行土体加固和门架式结构施工后,地铁隧道现场监测数据为 7.80 mm,比数值模拟结果小,隧道隆起变形得到明显控制,满足地铁保护区隧道结构安全的相关规定。

表 3 1 号线隧道现场监测数据统计表

Tab.3 Statistics of Line 1 tunnel field monitored data

单位:mm

日期	各监测断面里程处各测点的变形量									
	SK26 + 347					SK26 + 367				
	DD3-1	DD3-2	DD3-3	DD3-4	DD3-5	DD5-1	DD5-2	DD5-3	DD5-4	DD5-5
2015-11-17	-0.5	0.1	0.3	-0.1	0.6	0.6	-1.0	0	-0.8	0.1
2016-02-25	0.9	1.3	1.5	1.1	1.8	2.0	-0.7	1.1	1.2	1.9
2016-03-13	2.6	2.7	2.8	2.7	3.5	2.9	-0.8	2.1	2.2	2.7
2016-03-16	5.1	5.5	5.8	6.7	6.7	6.2	3.2	5.5	2.3	6.8
2016-03-20	6.1	6.2	6.3	7.0	7.5	7.0	5.3	5.1	3.6	7.0
2016-05-30	6.7	5.5	7.0	7.7	7.8	6.2	5.1	5.3	4.6	6.5

5 结论

1) 相比注浆加固保护方案和未采取加固保护方案,门架式保护方案对地铁隧道变形的控制针对性更强,效果更加明显,安全保护性更可靠。

2) 门架式保护结构中抗拔桩加长到一定程度后,继续增加桩长对控制地铁隧道变形的效果不明显,综合效益不高。

3) 后续需根据不同地质条件、不同隧道型式等因素,深入分析门架式保护结构的型式及其相关参数,以指导设计施工。

参考文献

[1] 彭琦,王建新,刘建国. 考虑流固耦合效应的基坑开挖施工对

[4] 任建喜,冯晓光,刘慧,等. 地铁车站深基坑围护结构变形规

地铁隧道结构影响分析[J]. 隧道建设,2013(7):557.

PENG Qi, WANG Jianxin, LIU Jianguo. Analysis of influence on metro tunnel structure caused by foundation pit excavation, considering fluid-solid coupling effect [J]. Tunnel Construction, 2013(7): 557.

[2] 张保存,董秀竹,郑刚. 近接基坑开挖对既有地铁结构影响的数值模拟分析[J]. 铁道标准设计,2012(1):62.

ZHANG Baocun, DONG Xiuzhu, ZHENG Gang. Numerical simulation analysis for effects on existing metro structure due to excavation nearby[J]. Railway Standard Design, 2012(1):62.

[3] 王伟. 紧邻新建地铁深基坑的既有地铁结构安全性评估与监控[J]. 铁道建筑技术,2012(2):38.

WANG Wei. Safety evaluation and monitoring of existing railway near the deep foundation pit of newly built railway[J]. Railway Construction Technology, 2012(2):38.

- 律监测研究[J]. 铁道工程学报, 2009(3): 89.
- Ren Jianxi, FENG Xiaoguang, LIU Hui, et al. Research on the deformation law of supporting structure for deep foundation pit of metro station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(3): 89.
- [5] 曾远, 李志高, 王毅斌. 基坑开挖对邻近地铁车站影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005(4): 642.
- ZENG Yuan, LI Zhigao, WANG Yibin. Research on influencing factors of deep excavation adjacent to subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(4): 642.
- [6] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起临近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016(4): 59.
- ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(4): 599.
- [7] 魏少伟, 张玉芳, 郑刚. 基坑开挖对坑底已建隧道影响的三维数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(增刊1): 112.
- WEI Shaowei, ZHANG Yufang, ZHENG Gang. Three dimensional numerical investigation of the influence of basement excavation on underlying tunnels[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013(S1): 112.
- [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(12): 2224.
- ZHOU Zelin, CHEN Shougen, CHEN Liang, et al. Analysis of uplift deflection of subway tunnel due to adjacent pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015(12): 2224.
- [9] 孔娟. 地下道路建设对下方地铁隧道结构的影响分析[J]. 土工基础, 2019(3): 276.
- KONG Juan. Impact of the underpass construction on the underlying subway tunnel structure[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019(3): 276.
- [10] 雷亚峰, 何修义. 明挖隧道施工期间下方共线地铁盾构区间上浮控制技术——以深圳市桂庙路快速化改造工程为例[J]. 隧道建设, 2019(11): 1888.
- LEI Yafeng, HE Xiuyi. Floating control technology of lower collinear metro shield section during cut-and-cover tunnel construction: a case study of rapid rehabilitation project on Guimiao Road in Shenzhen[J]. Tunnel Construction, 2019(11): 1888.
- [11] 深圳市水务规划设计院. 前海深港合作区双界河水廊道工程地铁保护方案[Z]. 深圳: 深圳市水务规划设计院, 2014.
- Shenzhen Water Planning & Design Institute Co., Ltd. Metro protection scheme of Qianhai Shenzhen Hong Kong cooperation zone Shuangjie River corridor project[Z]. Shenzhen: Shenzhen Water Planning & Design Institute Co., Ltd., 2014.
- [12] 高广运, 高盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010(3): 453.
- GAO Guangyun, GAO Meng, YANG Chengbin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(3): 453.
- [13] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009(5): 1373.
- ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(5): 1373.
- [14] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004(12): 1885.
- YANG Guanghua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(12): 1885.

(收稿日期: 2020-08-10)

中国在新疆建成世界上首条环绕沙漠铁路

中国国家铁路集团 2022 年 6 月 15 日宣布, 16 日将在中国西北部新疆维吾尔自治区开通一条新的铁路路段, 长度为 825 km。自此, 中国将建成世界上第一条环绕沙漠的铁路环线, 该环线环绕广阔的塔克拉玛干沙漠, 全长 2 712 km。同济大学《城市轨道交通研究》杂志主编、轨道交通专家孙章教授日前接受《环球时报》采访时说, 环线铁路对区域经济发展的提升作用并不是用加法来衡量, 而是以乘法来评估的; 环塔克拉玛干沙漠的铁路将极大地提振南疆的经济。环沙漠铁路相对较低的运行速度意味着它既可以运送旅客, 也适合货物运输, 这对资源丰富的地区来说也十分有利。

截至 2021 年年底, 中国铁路总运营里程超过 15 万 km, 其中高速铁路超过 4 万 km。

(摘编自: 20220616《环球时报》, 记者 褚大业)