

水平定向钻施工对邻近隧道结构的影响分析

姜海刚¹, 柳华荣^{2,3}, 司小东¹

(1.中交公路规划设计院有限公司,北京市 100088; 2.青岛地铁集团有限公司,山东 青岛 266100;

3.青岛市地铁四号线有限公司,山东 青岛 266100)

摘 要: 青岛市某中水管线完善工程采用水平定向钻施工方法,施工采用分级扩孔,管线邻近青岛地铁 2 号线辽阳东路站-东韩站区间,管线与地铁区间结构外边线最小水平距离 4.5 m,区间地铁现已正常运营,水平定向钻施工可能会引起地层移动和变形,导致青岛地铁 2 号线辽阳东路站-东韩站区间结构随之发生移动和变形。基于此,采用数值模拟方法,建立仿真模型,计算分析水平定向钻施工过程中,不同孔径条件下,泥浆压力和管线与隧道的水平净距对既有隧道变形的影响规律。计算分析得:水平定向钻开挖后,该地铁区间结构水平位移 0.967 mm,横向高差 0.152 mm,水平定向钻开挖对隧道的影响在安全可控范围内。

关键词: 水平定向钻;隧道结构变形;扩孔;泥浆压力;水平净距

中图分类号: TU990.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0252-04

0 引 言

自 20 世纪 70 年代以来,水平定向钻作为一种非开挖敷设管线技术,因其不阻碍交通,不影响绿植、景观,不占用土地等优势,在供水、电力、天然气、煤气和石油等管道铺设工程中应用广泛。伴随城镇化建设的发展,水平定向钻技术发展迅速,涉及管线穿越河道、基础和隧道等既有结构的项目与日俱增,目前针对施工过程中对既有建筑的影响研究并不多见,可以借鉴的工程案例有限,计算模型建立没有统一的标准。因此,水平定向钻施工对既有隧道的影响研究有重要意义。

针对水平定向钻工程的研究目前主要集中于埋管的线路设计和管道的受力分析。梁骁男等^[1]对多个水平定向钻穿越黄河工程,提出水平定向钻线路设计方法,开发线路设计程序。杨先亢等^[2]对比不同的水平定向钻管道穿越回拖力计算公式,结合现场施工实例,提出各个公式的应用范围。张官珍等^[3]依托焦作供水博爱线,提出水平定向钻泥浆改进方案。董智杰^[4]依托水平定向钻穿越南水北调中线总干渠工程,针对卵砾石地层,从施工流程各个步骤出发,制定合理的施工方案,为类似工程提供参考。刘旺兵^[5]依托榕江穿越工程,结合现场施工环境,提出了水平

定向钻施工质量控制方案。徐国华等^[6]采用有限元分析法对水平定向钻的钻架进行受力分析,提出了水平定向钻钻架强度优化方案。近年来,针对水平定向钻对周边环境的影响研究主要集中于堤坝安全防控方面。例如,余剑平等^[7]探讨了定向钻穿越堤防堤基时产生的渗流影响,并且针对该影响进行分析,提出了具体的防渗方案。张胤等^[8-9]采用理论分析的方法,探究水平定向钻施工对堤坝稳定性影响;采用数值模拟的方法,探究水平定向钻扩孔步骤对堤坝安全性能的影响。朱晶等^[10]采用数值模拟的方法,分析了水平定向钻的埋深与孔径等因素对施工过程中堤防安全稳定的影响。

本文依托青岛市某中水管线完善工程,主要计算评估深圳路周边中水管线完善工程项目施工对地铁 2 号线辽阳东路站-东韩站区间结构的影响,不同孔径条件下,管线与隧道的水平净距和泥浆压力对隧道既有变形的影响规律,为以后类似的工程提供参考。

该工程位于青岛地铁 2 号线辽阳东路站-东韩站区间内,目前地铁 2 号线已通车运营。中水管线完善工程水平定向钻段管线与地铁区间结构外边线最小水平距离 4.5 m。

1 工程背景

青岛市某中水管线完善工程管线由中水加压后通过直径 0.315 m 的中水管道输送。如图 1 所示,管线与青岛地铁 2 号线辽东区间隧道区间结构外边线

收稿日期: 2022-03-08

作者简介: 姜海刚(1980—),男,本科,工程师,从事岩土工程设计咨询工作。

最小水平距离 4.5 m,地铁埋深最大 9.2 m。工程沿深圳路以水平定向钻(DE315)方式施工长度为 217.6 m。水平定向钻机进行管线穿越主要施工工序有钻导向孔、分级扩孔、管道回拖。导向孔孔径 0.16 m,分级扩孔最大孔径 0.48 m(约 1.5*D*)。穿越主要地层包括①杂填土、⑦粉质黏土、⑨粗砾砂层、⑫粗砾砂层、⑬强风化花岗岩层、⑭中风化花岗岩层。场区地下水类型按赋存方式分为第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两类。第四系松散岩类孔隙水水力性质为潜水,主要含水地层为第 9 层中粗砂、第 12 层砾砂,属中等~强透水层。风化岩裂隙水水力性质表现为潜水,主要赋存于强、中风化岩层中。

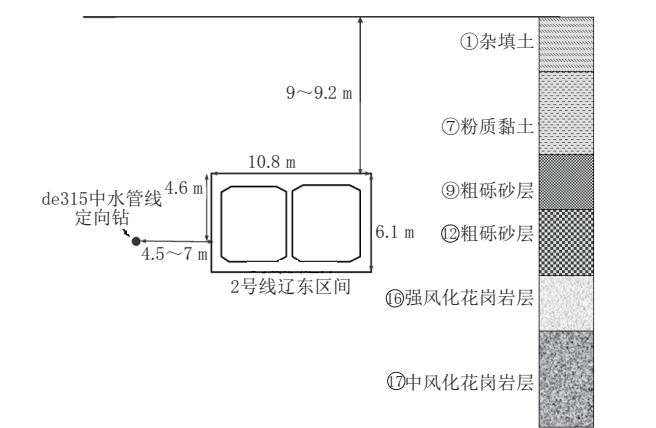


图 1 中水管线与地铁 2 号线辽东区间竖向关系示意图

2 数值模拟

2.1 模型建立

为模拟该中水管线完善工程项目水平定向钻施工过程,采用 Flac3D 数值模拟软件。建立二维数值仿真模型。如图 2 所示,模型长 70.8 m,高 25 m。其中①杂填土 3 m,⑦粉质黏土层厚 5 m,⑨粗砾砂层厚 3 m,⑫粗砾砂层厚 4 m,⑬强风化花岗岩层厚 3 m,⑭中风化花岗岩层厚 6.55 m。隧道位于⑨粗砾砂层、⑫粗砾砂层和⑬强风化花岗岩层中,隧道顶埋深 9.15 m。地层结构采用摩尔库伦模型,隧道采用弹性模型。

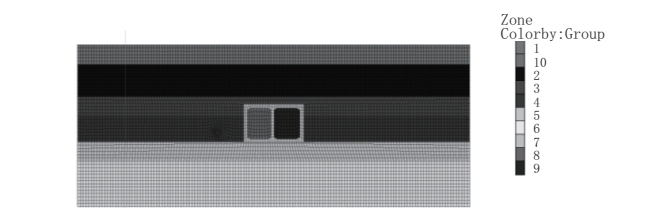


图 2 计算模型及剖分单元示意图

2.2 参数选择

土体物理力学参数如表 1 所示,隧道模型参数设置如表 2 所示。

表 1 岩土体的物理力学指标

材料	重度 / (kN·m ⁻³)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
①杂填土	17.5	33.33	11.11	5.0	15.0
⑦粉质黏土	19.6	11.94	4.89	20.1	8.3
⑨粗砾砂	18.5	52.63	22.90	0.0	30.0
⑫粗砾砂	19.0	142.10	61.83	0.0	33.0
⑬强风化花岗岩	23.0	150.00	69.23	20.0	35.0
⑭中风化花岗岩	25.0	3 750.00	1 730.80	20.0	55.0

表 2 隧道模型参数选择

名称	材料	重度 / (kN·m ⁻³)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa
区间隧道结构	C30 混凝土	25.0	30 000.0	11 538.5

2.3 边界与初始条件

(1)边界条件。左右两端端面受水平约束,垂直方向底面受竖向约束,顶面为自由表面,模型前后方向无位移。

(2)初始条件。根据工程地勘资料,⑨粗砾砂层、⑫粗砾砂层为含水层,考虑地下水对隧道的作用,对隧道顶底面施加差值为 59.8 kPa 的浮力。

2.4 施工过程模拟

采用 model null 指令杀死管道内部土体单元,并于钻孔内壁一周均匀施加沿径向的注浆压力,模拟定向钻扩孔过程。

3 水平定向钻穿越对隧道变形的影响分析

3.1 泥浆压力与管径的综合影响分析

水平定向钻穿越时,孔内泥浆压力是重要的施工参数。过大的泥浆压力将对周边环境造成很大扰动,压力过小将导致成孔质量差,后续管道拖动困难。查阅文献[11]可知,水平定向钻泥浆压力一般取 1.0 MPa 左右。改变水平定向钻的泥浆压力,计算 0.9 MPa、1.0 MPa、1.1 MPa、1.2 MPa,相应管径为 0.16 m、0.32 m、0.48 m 时,水平定向钻施工对既有隧道变形的影响计算结果如表 3、表 4 所示,根据计算结果绘制成图 3、图 4。

表 3 不同泥浆压力及管径水平定向钻施工邻近隧道结构横向高差

泥浆压力 /MPa	隧道横向高差 /mm		
	孔径 0.48 m	孔径 0.32 m	孔径 0.16 m
0.9	0.042	0.016	0.009
1.0	0.152	0.078	0.010
1.1	0.216	0.165	0.013
1.2	0.273	0.271	0.018

表4 不同泥浆压力及管径水平定向钻施工邻近隧道结构水平位移

泥浆压力 /MPa	隧道水平位移 /mm		
	孔径 0.48 m	孔径 0.32 m	孔径 0.16 m
0.9	0.677	0.114	0.018
1.0	0.886	0.220	0.026
1.1	1.280	0.384	0.040
1.2	1.598	0.601	0.061

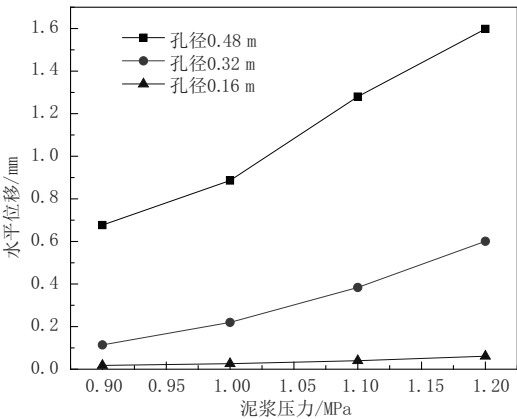


图3 水平定向钻泥浆压力及管径变化对邻近隧道结构水平位移影响规律

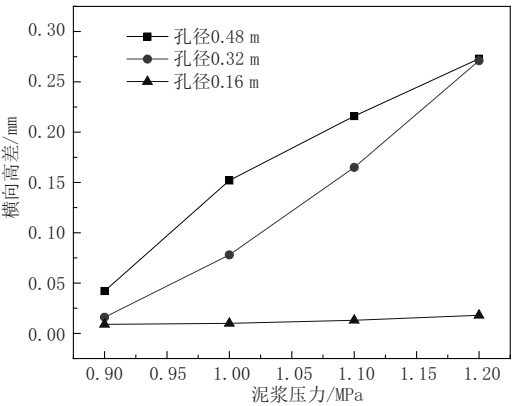


图4 水平定向钻泥浆压力及管径变化对邻近隧道结构横向高差影响规律

由图3、图4可知,泥浆压力越大,水平定向钻开挖后,隧道两端横向高差越大,隧道水平位移越大。孔径为0.16 m时,水平定向钻开挖对隧道结构几乎无影响。孔径为0.48 m时,水平定向钻开挖对隧道的影响最大。当泥浆压力为1.2 MPa时,水平定向钻与隧道之间的土体中存在较大塑性区,应力应变呈非线性关系,造成0.32 m与0.48 m管径施工隧道的横向高差相近。由表3、表4可得取泥浆压力为1.2 MPa,最大横向高差为0.273 mm,最大水平位移为1.598 mm。

3.2 管道与隧道的净距与管径的综合影响分析

水平定向钻穿越时,管道与隧道结构的净距直接影响扰动的大小。改变水平定向钻与隧道既有结构之间的距离,取泥浆压力为1.0 MPa,计算3.0 m、4.5 m、6.0 m、7.5 m,相应管径为0.16 m、0.32 m、0.48 m时,

水平定向钻施工对既有隧道变形的影响计算结果如表5、表6所示,根据计算结果绘制成图5、图6。

表5 不同管道与隧道水平净距水平定向钻施工邻近隧道结构横向高差

管道与隧道的 水平净距 /m	隧道横向高差 /mm		
	孔径 0.48 m	孔径 0.32 m	孔径 0.16 m
3.0	0.914	0.614	0.042
4.5	0.152	0.079	0.010
6.0	-0.174	-0.045	-0.011
7.5	-0.201	-0.145	-0.007

表6 不同管道与隧道水平净距水平定向钻施工邻近隧道结构水平位移

管道与隧道的 水平净距 /m	隧道水平位移 /mm		
	孔径 0.48 m	孔径 0.32 m	孔径 0.16 m
3.0	2.307	1.016	0.077
4.5	0.967	0.220	0.026
6.0	0.401	0.071	0.009
7.5	0.412	0.064	0.006

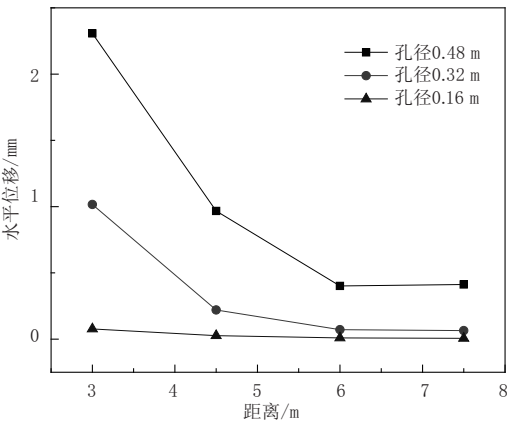


图5 水平定向钻与隧道水平净距及管径变化对邻近隧道结构水平位移影响规律

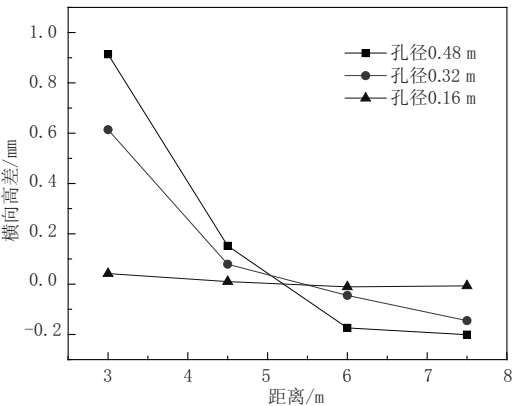


图6 水平定向钻与隧道水平净距及管径变化对邻近隧道结构横向高差影响规律

由图5可得,隧道的水平变形随管道与隧道的净距增大而减小,超过6 m以后,趋于稳定。由图6可得,水平定向钻开挖后,隧道结构两侧的横向高差

随管道与隧道的净距增大而减小,超过6 m以后,横向高差趋于稳定变形很小,绝对值小于0.2 mm。隧道结构两侧的横向高差随管道孔径的增大而增大。当水平定向钻与隧道距离较小时,隧道横向高差主要来源于水平定向钻造成的地层损失,隧道向水平定向钻侧倾倒,该影响随距离的增加而减小。当距离较大时,因泥浆压力的作用,隧道会有与原来相反的变形趋势,即在距离6 m以后会出现微小的负值横向高差。由表5、表6可得,孔径为0.48 m、管道与隧道水平净距为3 m时,隧道变形最大。此时,隧道横向高差为0.914 mm,隧道水平位移为2.307 mm。

深圳路中水管线完善工程管道与隧道水平净距4.5 m,由表5、表6可知,水平定向钻开挖后,隧道水平位移0.967 mm,横向高差0.152 mm。根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[12],隧道水平预警值10 mm,横向高差预警值0.152 mm,可知水平定向钻开挖对隧道的影响在安全可控范围内。

4 结 论

本文以深圳路中水管线完善工程为背景,建立水平定向钻侧穿隧道主体结构仿真模型,探究水平定向钻施工对既有隧道结构的影响。计算结果表明:

(1)水平定向钻孔内泥浆压力的大小对附近施工环境有影响,泥浆压力越大,水平定向钻开挖后,隧道两端横向高差越大,隧道水平位移越大。孔径为0.48 m、泥浆压力为1.2 MPa时,最大横向高差为0.273 mm,最大水平位移为1.598 mm。

(2)水平定向钻开挖后,隧道结构两侧的横向高差和水平变形随管道与隧道的净距增大而减小,超过6 m以后,隧道变形趋于稳定,变形很小。孔径为0.48 m、管道与隧道水平净距为3 m时,隧道变形最大,隧道横向高差为0.914 mm,隧道水平位移为

2.307 mm。

(3)水平定向钻施工初次扩孔孔径为0.16 m,此时对隧道结构的影响很小,隧道变形小于0.1 mm。第三级扩孔孔径为0.48 m,此时对隧道影响最大。深圳路中水管线完善工程管道与隧道水平净距4.5 m,水平定向钻施工造成的隧道水平位移0.967 mm,横向高差0.152 mm。根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》,隧道变形小于预警值,可知水平定向钻开挖对隧道的影响在安全可控范围内。

参考文献:

- [1] 梁晓男,梁光川,张建强,等.大型河流水平定向钻穿越技术研究[J].石化技术,2019,26(7):78.
- [2] 杨先亢,逄仲森,马保松,等.水平定向钻管道穿越回拖力计算公式的比较分析[J].石油工程建设,2011(1):1-5.
- [3] 张官珍,陈泽军,李鹏,等.水平定向钻环空泥浆改良施工技术及其评价——以焦作供水博爱线为例[J].人民长江,2017(21):92-95.
- [4] 董智杰.复杂地层下水平定向钻施工技术[J].水科学与工程技术,2019,213(1):84-87.
- [5] 刘旺兵.水平定向钻施工质量控制研究[J].化工管理,2019(29):157-158.
- [6] 徐国华,褚学宁,张在房.水平定向钻钻架有限元建模与分析[J].计算机仿真,2007,24(2):322-325.
- [7] 余剑平,胡维忠.定向钻穿越堤防对堤基的影响及防渗工程设计[J].人民长江,2006,37(8):81-83.
- [8] 张胤,程大鹏,罗坤,等.水平定向钻施工工艺对堤防稳定的影响分析[J].人民长江,2021,52(3):137-142.
- [9] 张胤,程大鹏,张朝利,等.水平定向钻扩孔施工工艺对堤防安全稳定的有限元分析[J].江苏水利,2020(4):33-38,44.
- [10] 朱晶,钟静文,许海峰,等.基于水平定向钻施工对堤防安全稳定的多因素综合分析[J].水利水电技术(中英文),2021,52(6):67-75.
- [11] 刘根诚.水平定向钻技术在管道穿越工程中的应用研究[J].全面腐蚀控制,2019,33(9):292-295.
- [12] CJJ/T 202—2013,城市轨道交通结构安全保护技术规范[S].

(上接第243页)

- [4] 陈观胜,胡响阳,陈雪仙.软土地基沉井施工中遇超沉与底涌问题的对策[J].浙江建筑,2004,21(增):74-78.
- [5] TERZAGHI K.Theoretical soil mechanics [M].New York:Wiley, 1943: 265.
- [6] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J].

Geotechnique,1956,6(1): 32-47.

- [7] SKEMPTON A W. The bearing capacity of clays [C]//Building Research Congress. London: [s.n.], 1951.
- [8] 胡安峰,陈博浪,应宏伟,土体本构模型对强度折减法分析基坑整体稳定性的影响[J].岩体力学,2011,32(增2):592-597.