

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.053

实地挖河对地铁隧道结构的影响分析

陈荣明

(上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海市 200120)

摘要: 上海市地铁线路繁多,河道建设工程常遇到已建地铁线路,在地铁线路正上方按规划实地开挖河道,卸土工程量大,会引起地铁隧道结构产生不利影响。以实际工程为例,通过荷载变化、回弹变形、隧道变形曲线曲率、相对变形等计算和有限元软件模拟,分析及研究施工对已建地铁运行影响。采取“河底抗浮底板+河底土体加固(三轴搅拌桩)+抗隆起桩(钻孔灌注桩)”的方式加以保护地铁隧道结构,减轻河道开挖对已建地铁的运行影响,为同类型项目建设提供参考。

关键词: 河道;地铁;开挖卸载;有限元分析;位移;应力

中图分类号: TV85

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0219-04

0 引言

随着上海城镇化的不断发展,城市轨道路网越发达。但外部工程与地铁相交处施工,会影响已建地铁隧道结构受力平衡,严重会导致地铁隧道结构出现变形,威胁地铁运行的安全。

上海地铁9号线于2007年开始运营,与规划外环运河正交。外环运河作为上海市浦东新区骨干河道,按规划进行实地开挖,需在地铁9号线正上方进行卸土,卸土高度最大处达5 m,易使地铁隧道结构产生相应的向上的浮力,本文选用PLAXIS有限元分析软件^[1],分析河道施工卸土对地铁9号线的相对变形及曲率半径影响。

1 工程概况

选取外环运河整治工程作为分析实例。外环运河为实地开河,北侧为拟建金海路,南侧为已建地铁。根据地铁管理部门提供的资料,规划外环运河河道走向跨过隧道结构,河道中心线与隧道中心线夹角约90°。根据上海市交通管理部门要求,隧道外边线外侧50 m内为安全保护区,在安全保护区内进行大面积增加或者减少荷载的活动,需采用安全加固措施^[2]。具体位置关系如图1所示。

地铁上、下行隧道结构外径规格为7.0 m,隧道间隔距离为8.2 m;河道影响范围内隧道结构顶标高

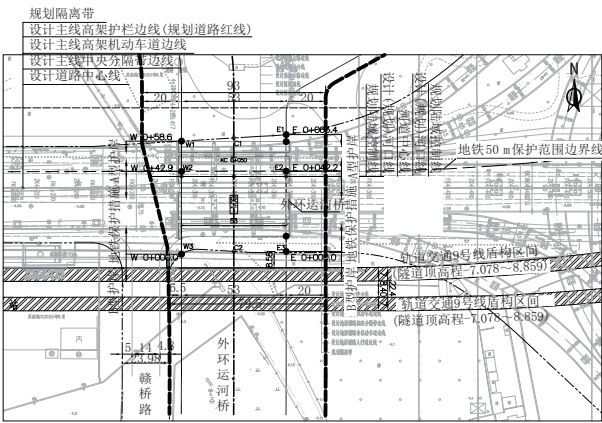


图1 地铁与外环运河平面走向布设图

在-7.1~-8.5 m之间,结构底标高为-14.1~-15.5 m。现状无水,按规划开挖河口宽53 m,河道底标高为-1.0 m,规划河底与隧道顶垂直方向上间距6.1~7.5 m。地铁与拟建河道垂直交叉段剖面如图2所示。

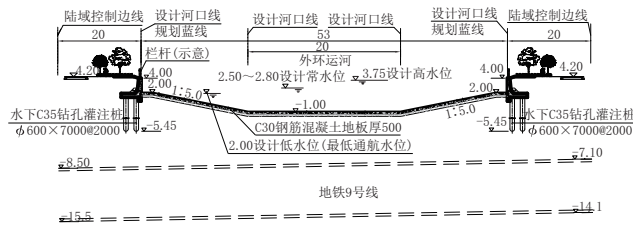


图2 地铁与拟建河道垂直交叉段剖面图(单位:m)

2 模型计算及相应措施

工程按规划实施外环运河,需评估开挖河道导致的大土方量卸土对地铁隧道结构影响程度,判断地铁隧道结构的保护措施是否满足要求。

2.1 计算条件

有限元分析模拟中土体采用莫尔库仑模型,实际

收稿日期: 2024-02-14

作者简介: 陈荣明(1991—),男,硕士,工程师,从事水工结构设计及涉河评估工作。

土层简化为水平土层,刚度参数根据经验值加以调整;地下水位生成静水压力,作为一个体力施加在土骨架上;外荷载简化为点荷载或均布等效荷载。表 1 中列出了填土、淤泥质粉质黏土及黏质粉土等土层的土体参数。根据经验, $E_{ci}=2.0\sim 5.0E_s$,本文取值为 4 倍。

表 1 地勘土体参数表

编号	厚度 / m	压缩模量 E_s /MPa	回弹模量 E_{ci} /MPa	γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /($^\circ$)
1	1.3	—	—	18.0	10	10.0
2	2.1	5.05	20.20	18.6	20	17.5
3	6.0	3.30	13.20	17.7	11	16.0
4	8.1	2.13	8.52	16.7	10	10.5
5	6.5	2.87	11.48	17.4	15	13.0
6	4.0	6.62	26.48	19.6	50	16.5
7	7.5	8.15	32.60	18.9	12	29.5

2.2 主要控制指标

在地铁 9 号线保护范围内实地开挖河道,跟地铁主管部门征询后,需针对地铁隧道结构采用一定的保护措施,确保轨道交通安全。

主要控制指标如下:

- (1) 施工期间地铁隧道结构的垂直位移变化累计值、水平位移变化累计量不得大于 0.01 m;
- (2) 地铁隧道结构变形曲线的最小曲率半径大于 1.5 万 m;
- (3) 相对变形大于 0.000 4;
- (4) 施工期间地铁隧道结构上部综合附加荷载不得大于 20 kPa;
- (5) 由于震动对结构引起的峰值速度不得大于 2.5 cm/s。

2.3 地铁隧道结构保护措施

位于轨道交通保护范围正上方的河道拟采用“河底抗浮底板+河底土体加固(三轴搅拌桩)+抗隆起桩(钻孔灌注桩)”的形式对轨道交通进行保护。轨道交通 9 号线区间隧道结构保护措施剖面如图 3 所示。

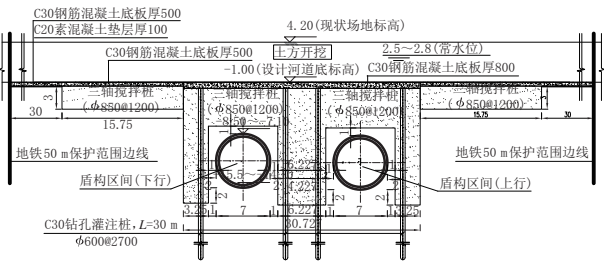


图 3 轨道交通 9 号线区间隧道结构保护措施剖面图(单位:m)

地铁盾构区间两侧,采用门式加固,结构型式采用 4 排钻孔灌注桩和分层双轴搅拌桩布置。其中三

轴搅拌桩采用 $\phi 850@1\ 200\ \text{mm}$ 布置,加固结构顺隧道走向长度约 64 m,垂直隧道走向宽度约 30 m,加固深度约 15 m。为减轻施工期间土体对隧道街道的扰动,安全加固措施与隧道结构外沿保持 1 m 安全距离。钻孔灌注桩采用 $\phi 600\ \text{mm}$ 型式,桩长 30 m,沿宽度方向于盾构区间两侧共布置 4 根桩,沿长度方向桩间距采用 2.7 m。河底设置 800 mm 厚 C30 钢筋混凝土抗浮底板。

地铁两侧 20 m 范围内,结构型式采用双轴搅拌桩加固。采用 $\phi 850@1\ 200\ \text{mm}$ 布置,加固结构顺隧道走向长度约 64 m,垂直隧道走向宽度约 16 m,加固深度约 3 m。河底设置 500 mm 厚 C30 钢筋混凝土抗浮底板。

地铁两侧 50 m 范围内,河底设置 500 mm 厚 C30 钢筋混凝土抗浮底板。

施工前对施工工艺进行复核,盾构上部施工机械综合附加荷载作用不得大于 20 kPa,若因施工工艺荷载超标时,可通过先人工卸土,再施工机械作业的方式,来减小综合附加荷载,达到规定要求。

本工程实施盾构结构安全加固措施后,应加强施工前、施工中和施工后三阶段的位移监测,确保振动峰值速度满足要求。

2.4 荷载变化

现状地面平均高程为 4.2 m,开挖至规划河底高程 -1.0 m,开挖深度为 5.2 m,计算基准面选定为隧道结构上部,最不利断面开挖前后的各土层自重应力变化详见表 2。

表 2 开挖前后的自重应力变化汇总表

编号	γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	开挖前 厚度 /m	开挖前 自重 /kPa	开挖后 厚度 /m	开挖后 自重 /kPa
1	18.0	0.5	9.00		
2	8.0	0.8	6.40		
3	8.6	2.1	18.06		
4	7.7	6.0	46.20	4.20	32.340
5	6.7	2.45	16.415	2.45	16.415
汇总			96.075		48.755

由此可知,施工后隧道上方土体自重减小了 47.32 kPa。

2.5 回弹变形计算

参照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)5.3.10 条有关规定,河道开挖卸载后的回弹变形按下式计算。

$$S_c = \varphi_c \sum_{i=1}^n \frac{p_c}{E_{ci}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (1)$$

式中: φ_c 为经验系数,可根据所在地区经验取值,本文取值为 1; p_c 为计算基准面以上各土层的自重压力,kPa; z_i 、 z_{i-1} 为计算基准面至各土层底面的距离,m; E_{ci} 为各土层回弹模量,kPa; $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ 为计算基准面至各土层底面平均附加应力系数。

按施工过程中最不利断面为例,区间隧道卸载 47.32 kPa,卸载宽度 $b=53$ m,卸载长度取 $l=53$ m(考虑隧道两侧主动土压力作用范围)。不采取保护措施

表 3 不采取保护措施的卸载引起的回弹量汇总表

编号	z_i /m	z_i /b	$\bar{\alpha}_i$	E_{ci} /MPa	回弹量 /mm
1	0.0	0.000 0	0.250 00	—	91.70
	1.0	0.037 7	0.249 92	13.2	
	2.0	0.075 5	0.249 85	13.2	
	3.0	0.113 2	0.249 77	13.2	
	4.2	0.158 5	0.249 68	13.2	
2	5.000	0.188 7	0.249 62	8.52	63.17
	6.000	0.226 4	0.249 31	8.52	
	6.65	0.250 9	0.249 04	8.52	
	7.50	0.283 0	0.248 69	8.52	
	8.50	0.320 8	0.248 27	8.52	
	9.50	0.358 5	0.247 86	8.52	
	10.50	0.396 2	0.247 44	8.52	
	11.50	0.434 0	0.245 23	8.52	
3	12.30	0.464 2	0.243 29	8.52	28.79
	13.00	0.490 6	0.241 60	11.48	
	13.65	0.515 1	0.240 03	11.48	
	14.60	0.550 9	0.237 74	11.48	
	15.60	0.588 7	0.235 32	11.48	
	16.60	0.626 4	0.241 28	11.48	
	17.60	0.664 2	0.239 83	11.48	
	18.80	0.709 4	0.238 09	11.48	

根据上表计算结果数据,选取 3 处典型截面隆起量,其中规划河底隆起量为 91.70 mm,隧道结构上部隆起量为 63.17 mm,隧道结构下部隆起量为 28.79 mm。

受卸载影响,未采用结构安全措施,开挖至规划河底直接卸载的施工方式对地铁隧道结构的影响不满足地铁保护要求。

为减少河道开挖对轨交造成的影响,拟采用“河底抗浮底板+河底土体加固(三轴搅拌桩)+抗隆起桩(钻孔灌注桩)”的形式对轨道交通进行保护。采用

该方法后,加固措施的自重可减小河道开挖产生的荷载变化值,同时双轴搅拌桩能提高加固土体的回弹模量。根据相关该地区工程经验,加固区域土体的回弹模量选用 52 MPa(标高 -1.80~-6.65 m)及 15 MPa(标高 -6.65~-16.65 m)。将钻孔灌注桩抗浮桩及抗浮底板作用考虑在内,最终卸载量为 3.67 kPa。采取保护措施的卸载引起的回弹量详细计算结果见表 4。

表 4 采取保护措施的卸载引起的回弹量汇总表

编号	z_i /m	z_i /b	$\bar{\alpha}_i$	E_{ci} /MPa	回弹量 /mm
1	0.0	0.000 0	0.250 00	—	4.28
	1.0	0.037 7	0.249 92	52.00	
	2.0	0.075 5	0.249 85	52.00	
	3.0	0.113 2	0.249 77	52.00	
	4.2	0.158 5	0.249 68	52.00	
2	5.0	0.188 7	0.249 62	52.00	3.70
	6.0	0.226 4	0.249 31	52.00	
	6.65	0.250 9	0.249 04	15.00	
	7.50	0.283 0	0.248 69	15.00	
	8.50	0.320 8	0.248 27	15.00	
	9.50	0.358 5	0.247 86	15.00	
	10.50	0.396 2	0.247 44	15.00	
	11.50	0.434 0	0.245 23	15.00	
3	12.30	0.464 2	0.243 29	15.00	2.11
	13.00	0.490 6	0.241 60	15.00	
	13.65	0.515 1	0.240 03	15.00	
	14.60	0.550 9	0.237 74	15.00	
	15.60	0.588 7	0.235 32	15.00	
	16.60	0.626 4	0.241 28	11.48	
	17.60	0.664 2	0.239 83	11.48	
	18.80	0.709 4	0.238 09	11.48	

根据表 3 和表 4 计算结果对比,可知在采取地基加固措施条件下,3 处典型截面隆起量均满足要求,其中规划河底隆起量为 4.28 mm,隧道结构上部隆起量为 3.70 mm,隧道结构下部隆起量为 2.11 mm。

2.6 有限元算法分析

根据本工程施工步骤模拟工况,计算工况如下:

- (1)计算工程初始应力场;
- (2)地铁隧道结构激活;
- (3)修改部分土体参数,模拟隧道结构保护措施效果^[3];
- (4)挖除①₁层杂填土土体至②层黏土底,施加地表水作用;

(5)开挖③层淤泥质粉质黏土至设计河底高程,施加地表水作用。

当河道按规划实施,位于常水位状态下的地铁隧道结构计算模型及结果如图 4 至图 6 所示。

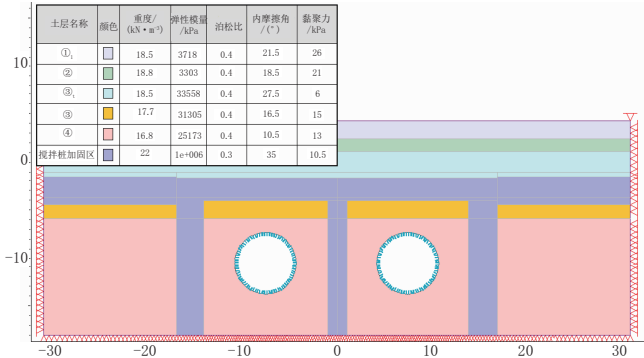


图 4 有限元分析模型

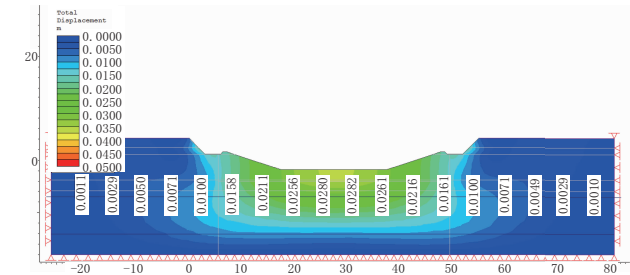


图 5 河道横断面土体变形图(最大变形值 28.2 mm)

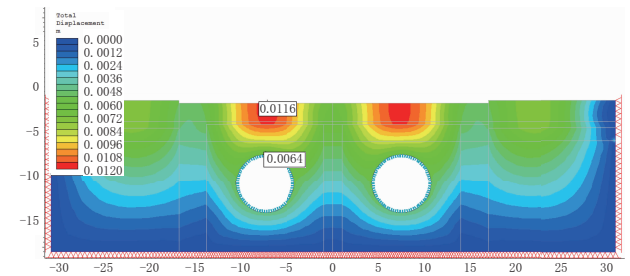


图 6 地铁隧道结构剖面土体变形图(最大变形值 6.4 mm)

2.7 地铁隧道结构变形曲率半径及相对变形复核

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)和有限元分析,计算的最不利断面回弹量结果汇总见表 5。

表 5 采取保护措施卸载引起的各节点回弹量汇总表

单位:mm

编号	河道底	地铁隧道结构顶板	地铁隧道结构底部	备注
1	4.28	3.70	2.11	规范
2	11.6	6.4	—	有限元分析

根据地铁隧道结构回弹量,按影响范围为 50 m 计算,得到地铁隧道结构变形曲率半径见表 6。

表 6 采取保护措施地铁隧道结构相对变形及曲率半径汇总表

编号	相对变形	曲率半径/m	备注
1	1/13 513	337 810	规范
2	1/7 812	86 486	有限元分析

上述两种方法计算的地铁隧道结构回弹量都小于 10 mm,满足隧道管理要求;相应最不利剖面的隧道变形曲线曲率半径大于 1.5 万 m,相对变形小于 0.000 4,均满足隧道管理要求。

3 结 语

本文以实际案例为基础,主要对比了采用地铁隧道结构保护措施前后的土体回弹量的变化,形成以下结论。

(1)地铁隧道结构正上方开挖深度最大,土体卸载最大,地铁隧道结构的隆起变化累计量不满足地铁保护控制要求。

(2)根据两种方式的计算,工程采用“河底抗浮底板+河底土体加固(三轴搅拌桩)+抗隆起桩(钻孔灌注桩)”的地铁隧道结构保护措施,是满足地铁保护控制要求。

(3)通过《建筑地基基础设计规范》公式和有限元分析对比论证,得出有限元分析可对涉河工程中隧道结构受力变形进行贴合度不错的模拟分析,可指导设计工作中指标量化评价,应积极用于河道建设对地铁隧道结构安全影响分析。

(4)施工时,施工单位应采取从河道两侧驳岸向河道中间推进的方式开挖。开挖过程中应合理设置分段距离及分层开挖深度,尽量将河道开挖的影响降到最小。

参考文献:

[1] 罗伟争. 河道施工对地下隧洞安全影响的 Plaxis 2D 有限元分析研究[J].水利规划与设计,2019(4):110-113.
[2] 刘尊景,周奇辉,陈昌平.河道施工对下卧地铁隧道的影响和保护措施[J].人民黄河,2019,41(增刊 2):120-123.
[3] 张端阳,陈颖辉.基坑开挖有限元分析中土体本构模型的修正[J].价值工程,2018,37(6):119-121.