

文章编号:1005-0523(2016)01-0094-06

类矩形盾构隧道施工期上浮影响因素分析

刘畅¹,周顺华¹,季昌¹,蒋敏²,李刚³

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.宁波市轨道交通集团有限公司,浙江 宁波 315101;
3.上海隧道工程有限公司,上海 200232)

摘要:以国内首例类矩形地铁盾构工程为背景,采用三维有限元软件 ABAQUS 建立类矩形隧道三维有限元模型,模拟计算同步注浆参数、千斤顶推力、后配套系统重量等因素对施工期类矩形盾构隧道上浮的影响。研究表明:通过增大类矩形隧道顶底注浆压力差、千斤顶水平推力、千斤顶竖直向下分力或后配套系统重量可减小施工期隧道上浮变形,采用初凝时间较短的同步注浆浆液是减小施工期隧道纵向变形最有效的措施。研究成果可为今后国内类矩形盾构施工提供参考。

关键词:类矩形盾构;数值模拟;施工期隧道上浮;影响因素分析

中图分类号:TU921;U455.43

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.01.014

近年来,随着地铁的大规模建设,城市地下空间利用效率的问题也逐渐凸显。在软土地区,盾构法施工作为一种对周边环境影响较小的方法,被广泛应用于地铁工程建设。常用的盾构隧道掘进机为圆形,原因是施工摩阻力小,能适应机头旋转,且圆形隧道结构受力合理,但是圆形隧道断面的空间利用率较低。于是异形盾构逐渐成为提高城市地下空间效率的研究方向,地下空间断面利用率更高的类矩形盾构隧道应运而生。2002年,日本在京都修建了世界上首条双线类矩形盾构地铁隧道线^[1]。2015年,我国宁波市轨道交通3号线一期出入段线类矩形盾构工程正式开始,标志着我国地铁盾构隧道建设迈向了一个新阶段。与单圆相比,类矩形隧道竖向受力面积更大、单环接头数量更多,其受力后呈现的总体性的浮沉变化规律更加复杂,而类矩形施工期隧道变形影响规律在国内无研究成果。基于此,依托宁波轨道交通3号线一期出入段线开展了施工期类矩形隧道变形规律研究。

在以往单圆盾构的实践当中,许多学者针对隧道管片施工阶段的受力特点,开展了管片施工期变形规律研究。陈仁朋等^[2]以宁波地铁某区间盾构隧道为背景,建立包含管片与螺栓、盾构机作用、浆液和水土压力作用的管片施工期变形三维分析模型,对管片施工期变形规律及其引起的管片环接头变形、螺栓受力进行了分析。叶俊能等^[3]采用有限元软件 ABAQUS 建立考虑管片环接头错台、张开影响的管片施工期变形分析数值模型,研究了管片变形发展规律及环间接头变形模式,并对宁波地铁、深圳地铁2种不同结构形式的管片容许变形量进行了对比分析。王其炎等^[4]以杭州地铁某盾构隧道为例,采用三维有限元软件对盾构在软土地层掘进过程中的管片上浮进行了分析,得出了管片上浮、管底处下卧土层回弹和管顶处上浮土层沉降随注浆压力、浆液弹性模量、土仓压力、千斤顶压力等因素变化发展的规律。此外,叶飞^[5]、张海涛^[6]、雷鸣^[7]等都对圆形盾构隧道施工期上浮问题展开研究,提出了一些施工期管片上浮控制措施,但国内尚无针对类矩形盾构隧道施工期变形的研究成果。

本文采用三维有限元软件 ABAQUS 模拟类矩形盾构的施工过程,分析同步注浆参数、千斤顶推力、后配

收稿日期:2015-10-15

作者简介:刘畅(1990—),男,硕士生,研究方向为隧道工程及岩土工程。

通讯作者:周顺华(1964—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道交通工程。

套系统重量等因素对施工期类矩形隧道上浮的影响规律,为今后国内类矩形盾构施工中隧道结构的上浮控制提供一定参考。

1 工程概况

宁波市轨道交通 3 号线一期出入段线采用类矩形盾构施工,开挖尺寸为 11 830 mm × 7 267 mm(宽度×高度)。管片外包尺寸为 1 150 mm × 6 937 mm (宽度×高度),管片厚度为 450 mm,环宽 1 200 mm。衬砌环全环共分为 11 块,分别由 1 块(F)、1 块(L)、3 块(B)、3 块(C)、2 块(T)及立柱(LZ)组成,衬砌结构如图 1 所示,管片采取错缝拼装,隧道管片采用 C50 混凝土预制。管片通过斜螺栓连接,环向由 40 根 M36 螺栓及 8 根 M27 螺栓连接,纵向由 30 根 M30 螺栓连接,并设置 10 个剪力销。

盾构主要穿越土层为 ②_{2b} 淤泥质黏土层和 ②_{2a} 淤泥层,地质纵断面如图 2 所示,隧道埋深 5.1~9.3 m,计算选取埋深为 10.0 m,各土层的物理力学参数如表 1 所示。

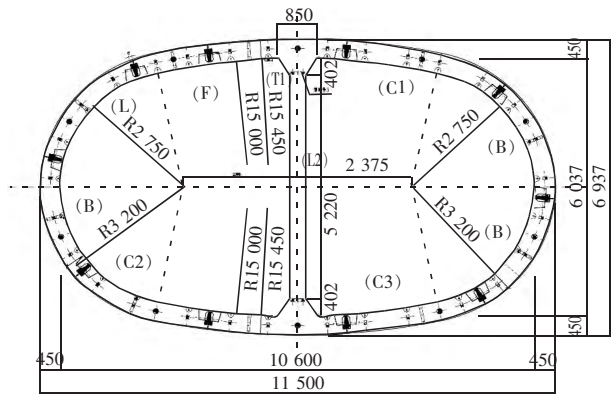


图 1 类矩形盾构衬砌结构图(mm)

Fig.1 Lining structure of the quasi rectangle shield(mm)

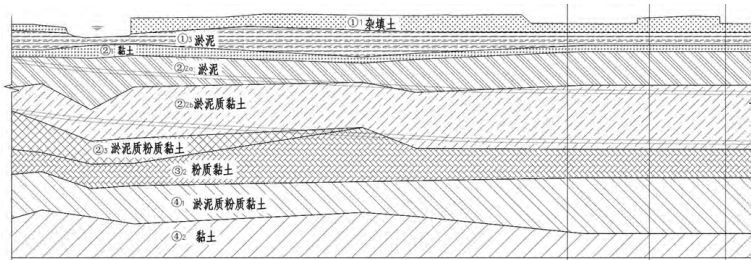


图 2 类矩形盾构区间地质纵断面图

Fig.2 Longitudinal section of the quasi rectangle shield tunnel

表 1 岩土体物理力学参数

Tab.1 Physico-mechanical indexes of soils

岩土编号	岩土名称	层厚 /m	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	粘聚力 C / kPa	回弹模量 /MPa	静止侧压力系数 K_0
① ₂	黏土	1.5	18.0	3.41	17.7	25.0	13.56	0.6
① ₃	淤泥	1.7	16.4	1.65	19.7	9.3	10.2	0.72
② ₁	黏土	0.8	18.3	3.15	16.1	14.5	12.5	0.63
② _{2a}	淤泥	4.4	16.5	1.63	13.6	8.5	9.2	0.72
② _{2b}	淤泥质黏土	8.4	17.2	2.02	15.3	10.5	11.6	0.67
③ ₂	粉质黏土	3.7	18.3	3.03	21.4	12.0	17.7	0.47
④ ₁	淤泥质粉质黏土	7.3	18.0	2.84	16.8	9.8	13.8	0.54
④ ₂	黏土	5.7	17.4	2.87	14.0	18.3	14.2	0.55

2 三维数值模型及参数

为明确盾构推进过程中,各施工影响因素对类矩形盾构隧道上浮的影响,以宁波轨道交通 3 号线出入段线为依托,采用三维有限元软件 ABAQUS 对施工期类矩形隧道上浮影响规律进行研究,力图揭示管片施工工期上浮变形模式。施工影响主要因素包括:同步注浆参数、千斤顶推力及后配套台车自重等。

有限元模型共包含 25 环管片,总长 30 m,隧道有限元模型见图 3。钟小春^[8]等研究发现,管片环弯曲刚度有效率从 0.4 增加到 1.0 时,其纵向弯曲有效率只增加了 1.5%,说明管片环向刚度对纵向变形影响很小,因此将管片环简化为均质类矩形环。

管片环缝设置接触,法向为硬接触,切向为摩擦接触,摩擦因数为 0.2。在 ABAQUS 软件中,环间螺栓、剪力销皆采用 spring 单元模拟,根据螺栓的结构与材料参数,模型中采用的纵向螺栓弹簧的抗拉刚度 K_t 和抗剪刚度 K_s 分别为 $3.12 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.20 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,剪力销抗剪刚度 K_x 为 $1.19 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。盾尾刷作用和地层约束同样采用 spring 单元模拟,土体基床系数为 $5\,500 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,有限元模型中管片外侧单元面积为 0.15 m^2 ,则土弹簧刚度 $K_t=820 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,盾尾刷弹簧刚度取 $7\,200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

根据实际工程中各施工期隧道上浮影响因素的可能取值,确定了类矩形盾构隧道施工标准工况:同步注浆浆液未凝固长度为盾尾后 6 环,盾尾位置拱顶、拱底的注浆压力分别为 200 kPa,300 kPa;千斤顶水平推力为 50 000 kN,竖向推力为 0;后配套自重为 2 000 kN。在标准工况下,采用单一变量法研究各单因素对施工期类矩形隧道上浮的影响规律。

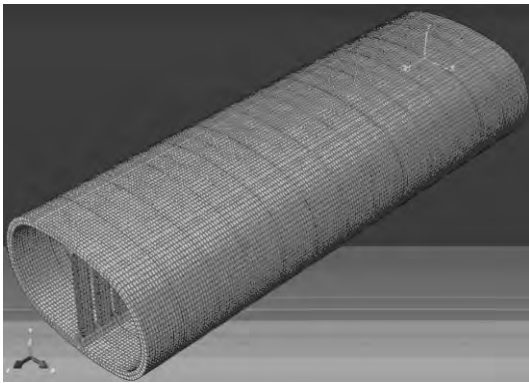


图 3 有限元网格图

Fig.3 Finite element model mesh

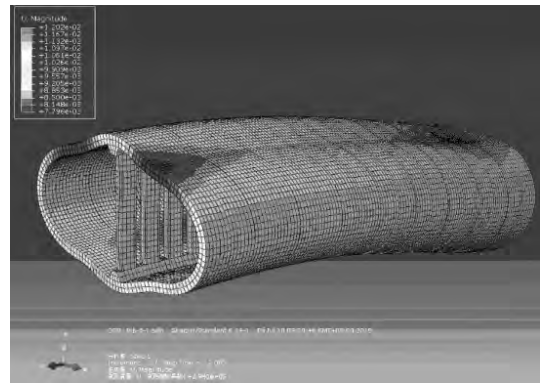


图 4 隧道纵向变形云图

Fig.4 Longitudinal deformation nephogram of the tunnel

3 不同因素作用下隧道上浮特性

3.1 同步注浆参数

不同种类或配比的同步注浆浆液的初、终凝时间会有所不同,施工过程中盾尾后部未凝固并产生强度的浆液分布范围也会改变,因此数值模拟中主要通过改变浆液未凝固长度来反映同步注浆浆液的性质变化,同时通过改变注浆荷载的分布和大小来反映注浆点位、注浆压力及注浆量的变化。

假定横断面的注浆压力随深度线性变化,如图 5 所示,P11,P21 分别为盾尾位置拱顶和拱底的注浆压力。同时假定盾尾到浆液凝固点范围内管片受到注浆压力的作用^[9],该长度范围内地层抗力为 0,注浆压力沿隧道纵向线性递减。在浆液未凝固长度范围以外,管片所受压力与周围地层的水土压力相同。

根据以往单圆盾构的施工经验,选定了浆液未凝固长度范围为盾尾后 3~15 m,也即盾尾后 3~12 环。类矩形隧道施工期最大上浮量及错台量随浆液未凝固长度的变化见图 6。

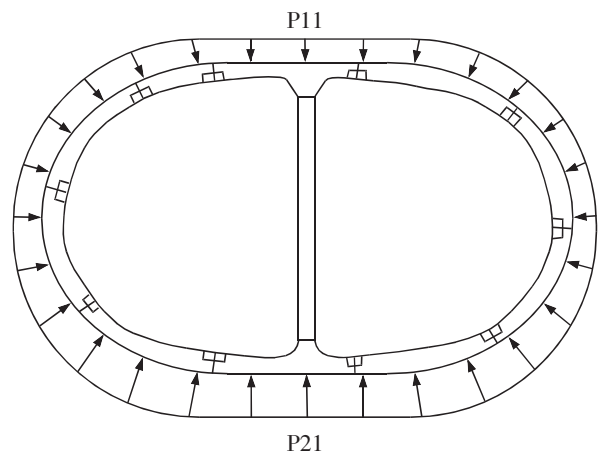


图 5 注浆压力分布图

Fig.5 Distribution of the grouting pressure

由图可知,随着同步注浆浆液未凝固长度加长,隧道最大上浮量及最大错台量线性增大。浆液未凝固长度每增加 3.6 m(3 环),隧道的最大上浮量增加约 1.17 mm,最大错台量增加 0.05 mm。当浆液未凝固长度为盾尾后 12 环时,隧道的最大上浮量为 10.81 mm,最大错台量为 0.47 mm。

通过对国内单圆盾构隧道同步注浆工艺进行调研,发现同步注浆压力通常介于 200~350 kPa。计算中选取的隧底注浆压力范围为 250~325 kPa,而隧顶注浆压力范围为 200~275 kPa。

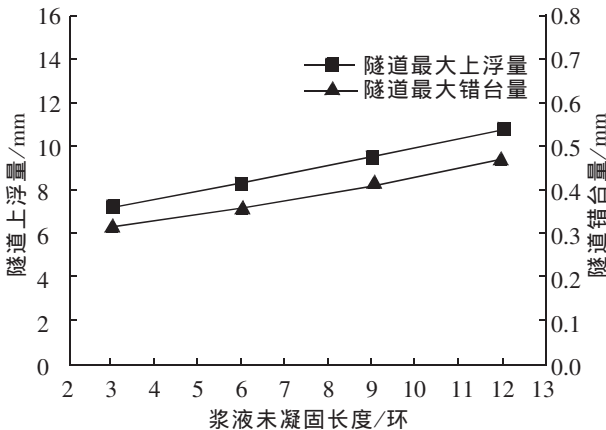


图 6 隧道纵向变形量随浆液未凝固长度的变化图

Fig.6 Longitudinal deformation of the tunnel with unset length of grouting

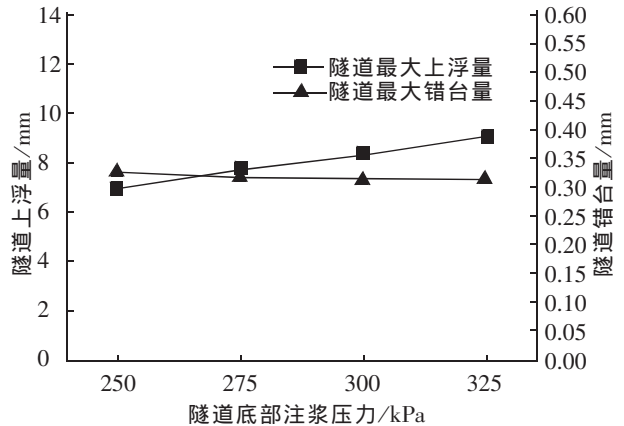


图 7 隧道纵向变形量随隧底注浆压力的变化图

Fig.7 Longitudinal deformation of the tunnel with grouting pressure at the bottom of the tunnel

图 7 为隧道顶部注浆压力为 200 kPa 时,隧道最大上浮量及错台量随隧底注浆压力的变化。由图可知,随着隧底注浆压力的增大,隧道最大上浮量线性增大,而最大错台量基本不变。隧底注浆压力每增大 25 kPa,隧道最大上浮量增加 0.66 mm。

图 8 为隧道底部注浆压力为 300 kPa 时,隧道最大上浮量及错台量随隧顶注浆压力的变化。随着隧顶注浆压力增大,隧道最大上浮量线性减小,但最大错台量变化不大。隧顶注浆压力每增大 25 kPa,隧道最大上浮量减小 0.57 mm 左右,而最大错台量稳定在 0.32 mm。

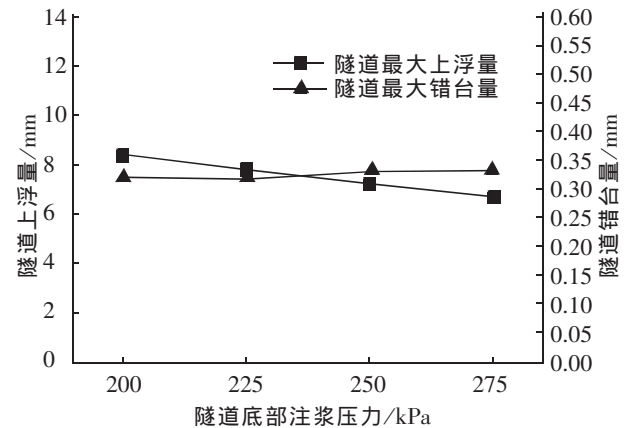


图 8 隧道纵向变形量随隧顶注浆压力的变化图

Fig.8 Longitudinal deformation of the tunnel with grouting pressure at the top of the tunnel

当隧道底部、顶部注浆压力分别为 325 kPa、200 kPa 时,隧道最大上浮量达到 9.08 mm,最大错台量为 0.32 mm。

3.2 千斤顶推力

本工程中千斤顶推进油缸共 32 个,最大推力为 2 500 kN 的有 12 个,最大推力为 3 000 kN 的有 20 个,故最大总推力为 90 000 kN。结合以往单圆盾构的施工经验,计算中选取了千斤顶水平推力范围为 20 000~65 000 kN,千斤顶竖向推力范围为 0~22 500 kN。

在千斤顶竖向分力为 0 的情况下,隧道最大上浮量及最大错台量随千斤顶水平推力的变化见图 9。

千斤顶水平分力越大,环与环间接触力越大,环间接头抗剪刚度就越大,因此随着千斤顶水平推力的增大,隧道的最大上浮量及最大错台量线性减小。千斤顶水平推力每增大 15 000 kN,类矩形隧道最大上浮量减小 0.30 mm 左右,最大错台量减小 0.05 mm 左右。千斤顶推力达到 65 000 kN 时,最大上浮量减小至 8.08 mm,最大错台量减小至 0.28 mm。

盾构机在斜坡段掘进或控制俯仰姿态时,会使千斤顶竖向分力增大。图 10 为千斤顶水平推力为 50 000 kN

时,隧道最大上浮量及最大错台量随千斤顶竖向分力的变化。

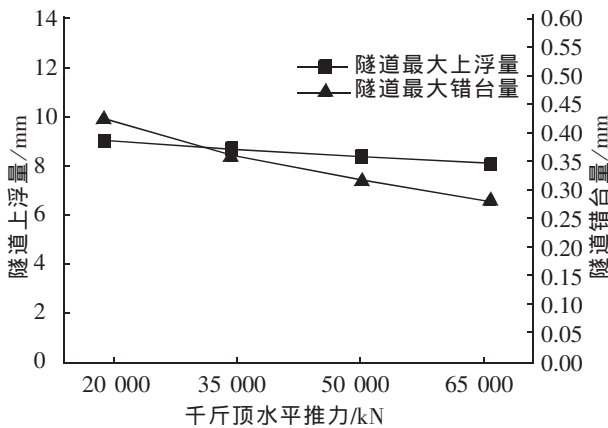


图9 隧道纵向变形量随千斤顶水平推力的变化图

Fig.9 Longitudinal deformation of the tunnel with horizontal cylinder thrust force

随着千斤顶竖直向下的分力增大,隧道的最大上浮量、错台量显著减小,这与宁波地区2例单圆盾构隧道试验段管片上浮的现场监测数据^[10]相符。千斤顶竖向分力每增大7 500 kN,类矩形隧道最大上浮量减小1.23 mm左右,最大错台量减小0.05 mm左右。千斤顶竖向分力达到22 500 kN时,最大上浮量减小至4.64 mm,最大错台量为0.20 mm。

3.3 后配套系统重量

后配套系统主要包括轨道运输设备、垂直提升设备、通风设备、注浆设备及供电系统等。结合以往单圆盾构的经验,选取了后配套系统压重范围为2 000~8 000 kN。模型中将后配套系统重量考虑成作用于左右线道床的均布荷载,荷载作用宽度为2.6 m,长度为25环,共30 m。

经过计算发现,后配套系统重量对隧道纵向变形影响较大,随着后配套压重的增大,类矩形隧道抵抗变形的能力越强,隧道最大上浮量与最大错台量都线性减小,后配套自重每增大2 000 kN,隧道最大上浮量减小1.90 mm左右,最大错台量减小0.06 mm。当后配套自重达到8 000 kN时,隧道最大上浮量减小到2.71 mm,最大错台量为0.14 mm。

4 结论

结合工程实际,借助有限元软件 ABAQUS 建立了三维有限元计算模型,对类矩形盾构隧道的施工过程进行了数值模拟,分析了各施工影响因素对类矩形盾构隧道上浮的影响规律,获得以下结论:

1) 施工阶段隧道纵向变形控制最有利的措施是减小浆液初凝点与盾尾之间的距离,可以通过选用初凝时间较短的浆液实现;提高隧顶注浆点位的注浆压力或减小隧底注浆点位的注浆压力也能有效减小施工期隧道纵向变形。

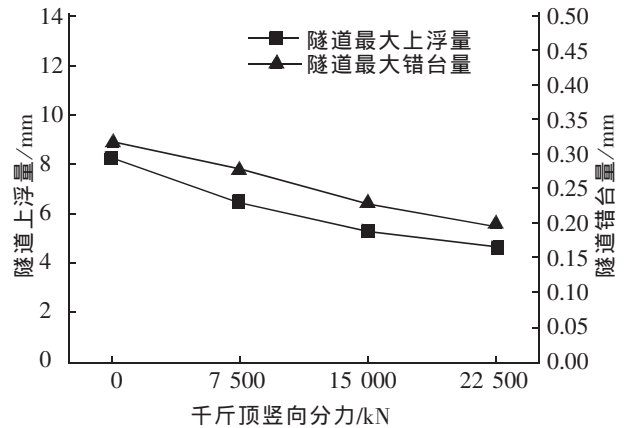


图10 隧道纵向变形量随千斤顶竖向分力(向下为正)的变化图

Fig.10 Longitudinal deformation of the tunnel with back-up system weight

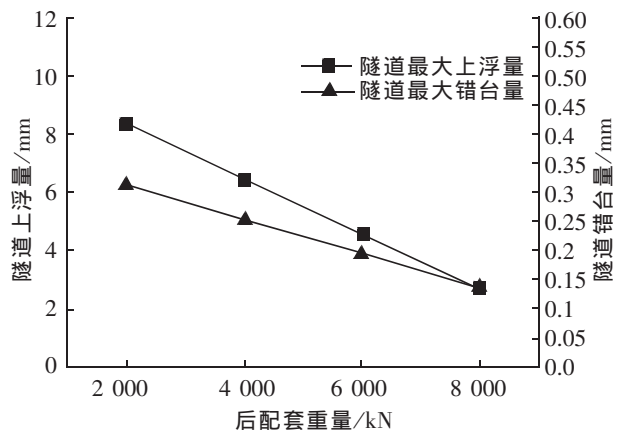


图11 隧道纵向变形量随后配套重量的变化图

Fig.11 Longitudinal deformation of the tunnel with downward cylinder thrust force

2) 千斤顶水平推力增大,环与环间接触力越大,环间接头抗剪刚度就越大,因此增大千斤顶水平推力可以减小施工期隧道纵向变形;斜坡段掘进或控制俯仰姿态时,通过增大千斤顶竖直向下分力,可以减小隧道上浮量。

3) 适当增加后配套系统的重量能够提高类矩形隧道抵抗变形的能力,从而有效减小隧道的施工期上浮量。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2014 年度统计分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2015.
- [2] 陈仁朋,刘源,刘声向,等. 盾构隧道管片施工期上浮特性[J]. 浙江大学学报:工学版,2014(6):1068-1074.
- [3] 叶俊能,刘源,陈仁朋,等. 盾构隧道管片施工期容许上浮量研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014(S2):4067-4074.
- [4] 王其炎,杨建辉,薛永利,等. 盾构在软土地层掘进过程中的管片上浮研究[J]. 现代隧道技术,2014(1):144-152.
- [5] 叶飞,朱合华,丁文其,等. 施工期盾构隧道上浮机理与控制对策分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008(6):738-743.
- [6] 张海涛. 盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D]. 同济大学,2007:63-81.
- [7] 雷鸣,张庆贺. 泥水盾构隧道上浮机理与控制技术[C]//中国土木工程学会第十二届年会暨隧道及地下工程分会第十四届年会论文集现代隧道技术,2006:110-113.
- [8] 钟小春,张金荣,秦建设,等. 盾构隧道纵向等效弯曲刚度的简化计算模型及影响因素分析[J]. 岩土力学,2011(1):132-136.
- [9] BEZUIJEN A, VAN LOTTUM H. Tunnelling. A decade of progress GeoDelft 1995-2006[M]. London:Taylor & Francis Group,2006.
- [10] 季昌,周顺华,许恺,等. 盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013(S2):3619-3626.

Influence Factor Analysis for Upward Floating of Quasi Rectangle Shield Tunnel in Construction Period

Liu Chang¹, Zhou Shunhua¹, Ji Chang¹, Jiang Min², Li Gang³

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2.Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315101, China; 3.Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: On the basis of the first domestic quasi rectangle railway shield, using 3D simulation finite element analysis software ABAQUS, this study establishes the 3D finite model of quasi rectangle shield tunnel and analyzes the upward floating deformation during construction caused by synchronous grouting parameters, cylinder thrust force, back-up system weight, etc. Results show that improving grouting pressure difference between the roof and bottom of the tunnel, horizontal and downward cylinder thrust force or back-up system weight can reduce upward floating deformation during construction. Using grout with a short initial setting time is the most efficient way to reduce the longitudinal tunnel deformation. The insights provided from this study may contribute to the improvement of quasi rectangle shield tunnel construction.

Key words: quasi rectangle shield; numerical simulation; upward floating during construction; influence factor analysis

(责任编辑 王建华)