

文章编号:1005-0523(2016)06-0050-08

越江隧道深切槽段上浮机理分析及控制研究

雷贺彩

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要:结合南京越江隧道深切槽段盾构隧道上浮问题,对盾构隧道上浮机理和上浮影响因素进行分析,然后通过数值模拟建立盾构隧道梁弹簧模型对施工期隧道上浮进行模拟,最后针对影响因素提出隧道上浮控制措施。研究表明:同步注浆初凝时间越短,掘进速度越快,隧道纵向抗剪刚度越大,后配套自重越大,同步注浆压力差越大,隧道施工期上浮会越小。此外,提前压低盾构姿态、使用摩擦系数更大的橡胶衬垫以及预应力螺栓等也可用来控制隧道上浮。

关键词:盾构隧道;越江隧道;上浮机理

中图分类号:U25

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.007

当前我国城市轨道交通建设迎来了蓬勃发展时期,盾构法因其对环境影响较小而得到广泛应用。在常规地铁建设中,盾构直径在6 m左右;然而很多大城市都在江河附近发展形成,城市地铁建设常常需要穿越特大江河。在工程设计中常常采用大直径盾构穿越特大江河,由于河水较深、隧道上覆土较浅等原因,施工期隧道面临着上浮风险^[1-2]。目前已有部分学者对越江隧道的上浮问题进行了研究:袁文君^[3]研究了城市地铁越江隧道上浮引起的土体变位规律;朱令^[4]壁后注浆引起隧道上浮对结构的影响;王新^[5]分析影响隧道上浮的物理环境和工艺操作,得到了可能产生隧道上浮力的主要因素;杜闯东^[6]研究和分析了施工中出现的管片上浮问题的根源;杨方勤^[7-8]通过分析了上海长江隧道动态上浮力,并提出隧道上浮稳定机理,给出了超大直径盾构法隧道上浮控制措施;曹文宏^[9]研究了隧道衬砌上浮的必然性和力学机理;田华军^[10]总结了国内第一条大直径泥水盾构施工穿越长江隧道管片上浮的原因和应对措施等等。已有研究中主要分析隧道上浮影响机理、上浮影响因素和工程中可采用处理措施,但对上浮的量化计算模型较少,对影响因素的敏感程度分析不够,以及采取措施后对上浮抑制效果评估较少。本文首先分析了南京越江隧道深切槽段所面临的上浮问题,然后通过数值模拟建立盾构隧道梁弹簧模型,对施工期隧道上浮进行分析。根据模拟结果得到各影响因素对上浮量的影响,以及如何控制各因素从而达到较好的隧道上浮控制。

1 工程背景

1.1 工程概况

南京地铁十号线越江工程采用1台外径为11.64 m的泥水平衡盾构机掘进,区间起点位于长江北岸的中间风井,线路出中间风井后,在纬七路过江隧道南侧向东依次穿越长江北岸大堤、城南河、潜洲、长江主航道、梅子洲江防大堤,到达南岸的江心洲站。区间线路全长3 600.074 m,过江段约2 627 m,平面最小曲线半径1 500 m,最大纵坡度28‰,最大变坡点为19.12‰(后坡点与前坡点之差)。隧道最大覆土厚度达37 m,最

收稿日期:2016-05-17

作者简介:雷贺彩(1982—),男,工程师,研究方向为铁路、地铁。

小覆土厚度为 9.4 m,江中段覆土埋深一般在 14~18 m。冲槽段最浅处仅为 11.4 m(约 1D,D 为盾构隧道直径),在三百年一遇洪水冲刷下,线路设计埋深仅为 5.3 m。深切槽段靠近江南大堤,浅覆土地段(覆土小于 1.2 倍盾构机直径)长度为 77 m,浅覆土地段向南为一水平长度 39.3 m 的陡坡,标高相差约 17.8 m。深槽段穿越地层主要为中粗砂,粉细砂,其工程性质与三号线穿越土层相似,透水性好,压缩性低。江心洲站—滨江大道站区间纵剖面如图 1 所示。

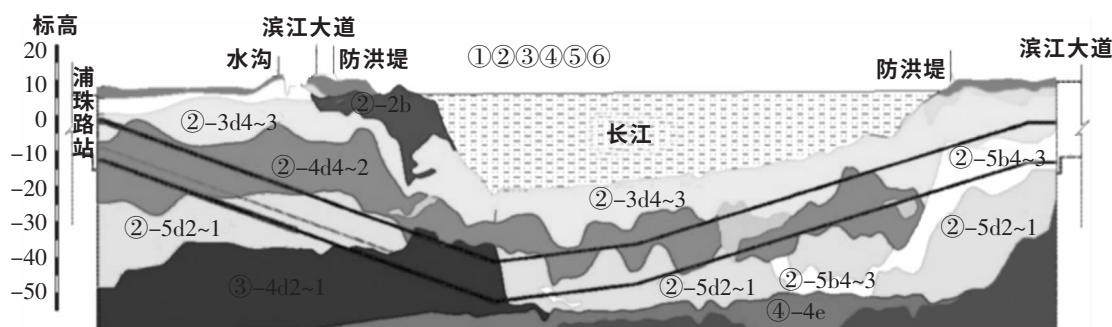


图1 线路走向示意图

Fig.1 Line alignment map

1.2 深切槽段隧道上浮机理分析

在越江隧道深切槽段施工时,深切槽区域上覆土厚度很小,从而管片间受到的摩擦力减小,导致隧道抗浮能力的减小;此外,由于大直径隧道断面过大受到的浮力也更大,如果施工处置不当,很容易发生上浮。当隧道结构自身抵抗上浮的能力小于隧道在浆液中的上浮力,管片表现为错台量大甚至螺栓被剪断,影响隧道的安全性与稳定性。

如图 2 所示,盾构脱出盾尾后,作用在刚脱出盾尾的管片和尚停留在盾构机内的管片之间会有较大的剪力 Q ,在上浮区域管片有发生错台趋势;由正面土仓压力导致管片间产生正压力,管片发生错动时会产生摩擦力,管片间摩擦力 $F=\mu P$, $P=(q_1+q_2)A/2=K_0\gamma hA$ (γ 为盾构正面土的平均重度; A 为盾构机开挖面的面积; K_0 为侧向土压力系数; μ 为管片和管片之间的摩擦系数)。管片间竖向剪力 Q 可以通过隧道纵受力剪力图计算得到,管片竖向剪力 Q 除了由摩擦力承担外,剩下部分要由纵向螺栓承担,纵向螺栓抗剪能力大小 S 可以通过试验确定;若衬砌环间未采取任何构造措施,隧道实际发生的上浮力 $N=Q-F$;若 $N\leq S$,隧道抗浮安全;若 $N\geq S$,隧道抗浮不足,需采取构造措施。

选取南京地铁十号线下穿长江段区间冲切槽段进行抗浮检算,在冲切槽段最浅处覆土厚度仅为 11.4 m,检算结果如表 1 所示,结果表明在深切槽段进行盾构施工易发生上浮。

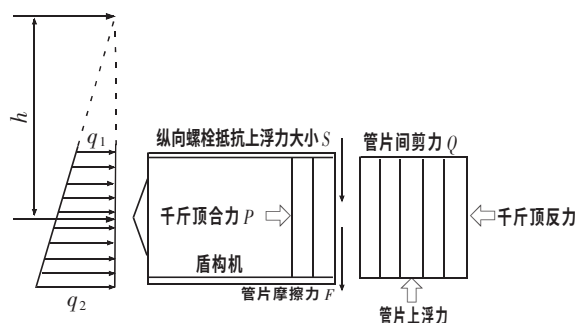


图2 管片脱出盾尾后力学简图

Fig.2 Mechanical diagram of escaped shield tail segments

2 隧道上浮影响因素分析

2.1 上浮影响因素分析

影响隧道上浮的因素归纳起来主要有同步注浆浆液特性、同步注浆压力差、隧道掘进速度、隧道纵向刚度、管片间摩擦力和后配套自重等。各因素定性分析如下:

1) 同步注浆,当浆液填充管片与土体之间的空隙后,浆液将管片完全包裹住,管片所受的力并不是土体的直接作用力,而是土体通过浆液传递作用在管片上的力。随着盾构的推进,管片周围浆液逐渐固化,强

度也随之增大,液体的土弹簧系数随时间逐渐变大,而管片所受浮力随着时间逐渐减弱;不难得出,在保证浆液的可泵送能力下,同步注浆浆液的强度增长得越快,隧道受到浮力的影响也就越小。

表 1 隧道上浮检算计算表
Tab.1 Check calculation of tunnel upward movement

名称	符号	单位	推进速度/(10 环/天)
盾构外径	D_0	m	11.2
盾构开挖面积	A	m^2	98
隧道中心覆土厚度	H	m	11.4
土体重度	λ	$kN \cdot m^{-3}$	19
千斤顶合力	P	kN	26 068
摩擦系数	μ	—	0.2
管片间摩擦力	$F=\mu P$	kN	5 213.6
隧道上浮产生管片间剪力	Q	kN	13 779
作用在隧道上实际浮力	$N=Q-\mu P$	kN	8 565.4
纵向螺栓抵抗上浮能力	S	kN	5 500
隧道抗浮检算	$K=S/N$	—	0.64
抗浮检算结果	—	—	不满足安全储备

2) 注浆压力差,在同步注浆过程中,由于注浆位置不同以及注浆孔压力不同产生的注浆压力差也会对隧道上浮产生一定的影响。同步浆液在凝固前,对隧道产生一定压力,当上方注浆孔和下方注浆孔注浆压力不一样时,对于隧道会产生一个由注浆压力差而带来的一个作用力。当上方注浆压力大时,会形成一个向下的作用力而减少隧道的上浮。

3) 推进速度,盾构推进速度用 v 表示,时间 t 后浆液强度达到土体强度,隧道所受浮力 q 随着浆液强度变化会发生相应变化。因此,管片上浮力可以表示为 $q=F(t)$,隧道所受到的上浮力合力表示为 Q ,则

$$Q = \int_0^L q dL = v \int_0^t F(t) dt \quad (1)$$

从上式可以看出,上浮合力随着掘进速度的增大而增大。当上浮合力增大时,对于接头处的实际上浮力也会增大,管片更容易发生剪切变形或者错台,对于隧道的累加剪切变形会更大,隧道的上浮量也更大。

4) 隧道纵向刚度,对于盾构隧道这一细长拼装型地下结构,沿着隧道轴线方向(纵向)和垂直于隧道轴线方向(横向)的管片均由螺栓进行连接,隧道横向刚度和纵向刚度受到诸多因素的影响。在施工期间隧道上浮研究方面,主要考虑隧道纵向的抗浮能力。显然可知隧道纵向刚度越大,隧道越不容易发生上浮。

5) 管片间摩擦力,在施工过程中,盾构总推力与上覆土厚度有关。总推力直接作用盾尾管片上使隧道纵向产生很大的轴力,在隧道上浮时会产生很大的摩擦力。当管片摩擦力不足抵抗上浮剪力的作用时,螺栓将承受额外的剪切力,从而发生剪切变形。因此,在计算隧道上浮时不但要考虑螺栓的抗剪能力还要考虑管片摩擦力提供的抗剪能力。隧道纵向剪力与上浮量之间关系可以表达为公式(2)

$$F_s' = f(s) \mu P \quad (2)$$

6) 后配套自重,当隧道结构和自重越大,越不容易发生上浮。Thomas Kasper 等国外学者通过研究不同后配套压重(1 990, 3 980, 5 970 kN)对隧道上浮的影响,证实了隧道配套压重的越大隧道抵抗上浮的能力越强的观点。

3 隧道上浮有限元计算分析

3.1 隧道上浮数值模拟

根据上述的定性分析,用有限元计算软件对南京地铁十号线越江隧道施工期间上浮进行数值模拟,分析各因素对隧道上浮的敏感程度。

采用以小泉淳为代表的以轴向、剪切和弯曲弹簧模拟接缝和螺栓、以梁单元模拟衬砌环的梁-弹簧模型进行数值模拟。管片外径 11.2 m,内径 10.2 m,环宽 2 m,混凝土弹性模量 3.65×10^7 kPa。管片接头旋转刚度系数方面的取值常根据经验和实验测定,直径大于 10 m 的盾构隧道,其管片接头旋转刚度系数的取值范围大约为 $0.8 \sim 8 \times 10^5$ kN·m·rad⁻¹,由于对上浮影响较大的是剪切刚度并非旋转刚度,本模型中选取 8×10^5 kN·m·rad⁻¹。剪切刚度 K_s 大多通过试验或者类似工程经验取得,本模型中设置剪切弹簧系数为 5×10^5 , 7.5×10^5 , 10×10^5 , 12.5×10^5 kN·m⁻¹ 四种情况来模拟不同隧道的纵向刚度对隧道上浮的影响。

在浆液凝固前管片受到浮力的作用,因此模型中梁单元数量取决于浆液影响范围的长度,即盾构掘进速度。以下通过设置不同的梁单元数量来模拟不同的掘进速度对隧道上浮的影响。模型的边界约束设置以下两种,尚停留在盾构机内的管片可看作铰支约束,在浆液凝固区域对管片的作用看作固定约束。

在浆液区的管片进行荷载约束设置,包括土压力荷载、浆液浮力荷载、注浆压力差荷载、自重后配套荷载、推力荷载。浆液的强度随着时间逐渐增大,浆液浮力荷载也逐渐减小。将浆液浮力随时间变化转化为随着盾构脱出盾尾距离变化,浆液影响范围为 25 环时浆液浮力荷载施加大小如图 3 所示,对模型中不同位置的梁单元施加相对于荷载。同步注浆压力差荷载通过转换成竖向荷载作用在刚脱出盾尾的两环管片上,设置不同的竖向荷载来考虑不同的同步注浆压力差的影响。自重和后配套荷载直接通过竖向重力系数为-1 施加在梁单元上。后配套荷载按照单位长度重量分别为 2.5, 5, 7.5, 10 t·m⁻¹ 的情况施加在梁单元上来模拟不同后配套重量对隧道上浮的影响。

如图 4 所示,建立 25 环有限元模型,可以看出隧道在刚脱离盾尾时受到剪力最大,管片发生错台,但上浮累计最大量为脱出盾尾一段距离,此后浆液逐步凝固,管片位移区趋于稳定。

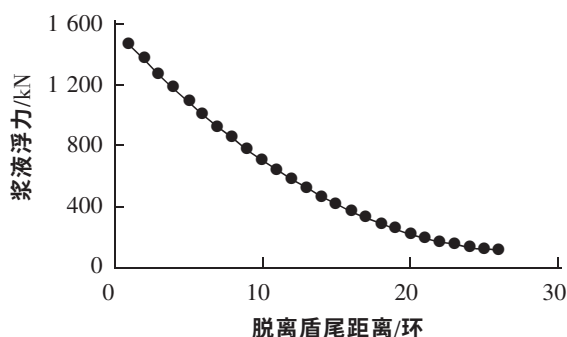


图 3 浆液浮力加载位置图

Fig.3 Location map of slurry buoyancy loading

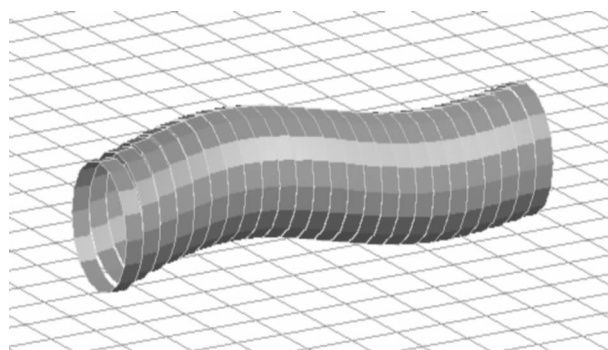


图 4 隧道计算模型上浮变形图

Fig.4 Deformation diagram of tunnel calculation model

3.2 隧道上浮模拟结果分析

3.2.1 盾构纵向刚度对隧道上浮的影响

通过设置不同的弹簧剪切刚度值,得到纵向螺栓剪切力与上浮量的关系如图 5 所示。可以看出,纵向连接螺栓的剪切刚度越大,相邻两环管片间错台量越小,隧道的最大上浮量越小。在隧道剪力图一致即隧道纵向螺栓承受的最大剪力一致情况下,隧道纵向螺栓剪切刚度与隧道最大上浮量之间的关系如图 6 所示。可以看出,隧道纵向剪切刚度越大,施工期隧道上浮量越小。通过提高隧道纵向螺栓的剪切刚度可以有效控制施工期间隧道上浮。

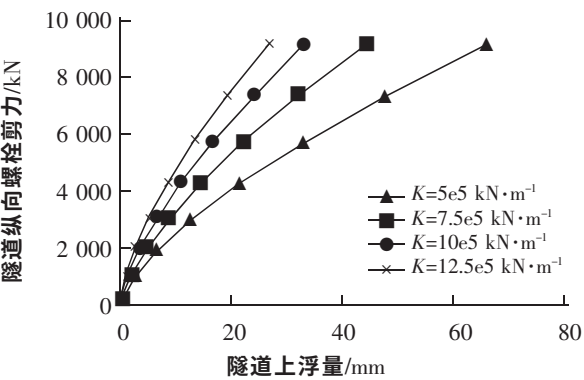


图 5 不同剪切刚度下隧道上浮量随纵向螺栓剪力变化图
Fig.5 Variation diagram of tunnel upward movement with vertical shear force of bolts for different shear stiffness

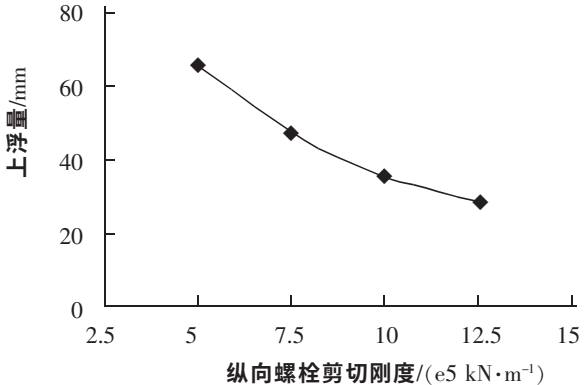


图 6 隧道上浮量随纵向螺栓剪切刚度变化图
Fig.6 Variation diagram of upward movement with vertical shear stiffness of bolts

3.2.2 同步注浆压力差对隧道上浮的影响

运用有限元软件模拟盾构施工过程中同步注浆压力差所产生的作用于管片上的竖向压力对隧道上浮的影响,在盾尾后部单环管片沿环向施加均布荷载。荷载施加在管片外壁上,方向垂直管片指向圆心,计算结果见表 2,从图 7 可以看出,随着盾尾单环上施加的同步注浆压力差的增大,隧道上浮量减小。但隧道上浮对同步注浆压力差敏感度不高,当注浆压力达到 0.6 MPa 时,隧道上浮量只减少 1/3,这主要是由于同步注浆压力差的影响范围有限,对隧道纵向剪力的影响较小。

表 2 同步注浆压力差对隧道上浮影响
Tab.2 Influence table of synchronous grouting pressure difference on tunnel upward movement

同步注浆压力差/MPa	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
竖向注浆压力/kN	1 120	2 240	3 360	4 480	5 600
隧道上浮量/mm	44.5	41.6	38.7	35.9	33

3.2.3 盾构自重及后配套自重对隧道上浮的影响

据实际的机械配置情况,盾构机自重分析按照 150,200,250 t 进行考虑。而脱出盾尾后存在的后配套系统,分别按照后配套总重量为 100,200,300,400 t 进行考虑,即后配套单位长度重量分别为 2.5,5,7.5,10 t·m⁻¹ 进行数值模拟(见表 3),分析后配套自重对脱出盾尾区段隧道变形的影响。图 7 可以得出,随着后配套系统重量的增大,隧道承受剪力会有所减小,隧道纵向螺栓所承担得剪力值会有所下降,剪切变形也会相应减小,因此上浮量减小,隧道抗浮能力提高。

表 3 后配套系统重量对隧道上浮影响
Tab.3 Influence of rear supporting system weight on tunnel upward movement

后配套系统重量/(t·m ⁻¹)	2.5	5	7.5	10
纵向螺栓剪力/kN	13 159	12 529	11 910	11 279
隧道上浮量/mm	64.2	58.2	52.3	46.5

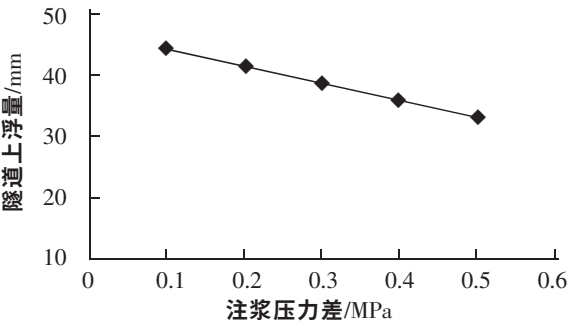


图 7 同步注浆压力差与隧道上浮量关系图
Fig.7 Relationship between pressure difference of synchronous grouting and tunnel upward movement

3.2.4 掘进速度对隧道上浮的影响

在浆液初凝时间不变的情况下,同步注浆浆液浮力的影响范围在隧道纵向与隧道掘进速度成正比。掘进速度越大,浮力影响区域越大,刚脱出盾尾的管片螺栓受到的剪力值也越大,隧道错台量也越大,更容易发生剪切破坏。因此,设置不同长度的影响区来代替掘进速度,分别建立浆液浮力影响区域为 10 环、16 环、20 环、25 环的计算模型,得出在不同的掘进速度下隧道的上浮量。根据公式(1)当掘进速度越大,浆液浮力影响范围越大,由计算结果图 8 可以看出,隧道上浮量也越大。因此,适控制掘进速度,降低浆液浮力影响范围,能够有效控制隧道上浮。

3.3.5 盾构管片间摩擦力对隧道上浮的影响

在深切槽盾构施工过程中,覆土厚度的变化会直接影响到掌子面水土合力的大小,从而影响管片间摩擦力的大小。在覆土厚度最浅的地方,管片间摩擦力最小,从而纵向螺栓承受的剪切力增大,当螺栓的抗剪能力小于其承受的剪切力时,发生剪切破坏或者管片错台。根据公式(2),看出隧道的抗浮能力与摩擦力之间的关系,然后通过不同的抗浮能力计算对应的隧道上浮量。因此,对南京地铁十号线越江区间选取特殊节点进行模拟,模拟结果见表 4。由图 9 可知隧道管片间轴力越大,盾构管片间摩擦力越大,隧道抗浮能力越强。在浅覆土施工过程中,由于水土合力的减小导致盾构推力的减小,从而导致管片间摩擦力的减小,很容易发生上浮。此外,摩擦系数更大的橡胶衬垫以及预应力螺栓可以提高隧道管片间摩擦力,从而提高隧道抗浮能力。

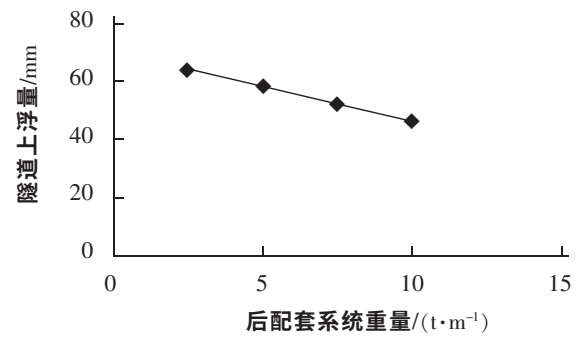


图 8 后配套系统重量与隧道上浮量关系图

Fig.8 Relationship between supporting system weight and tunnel upward movement

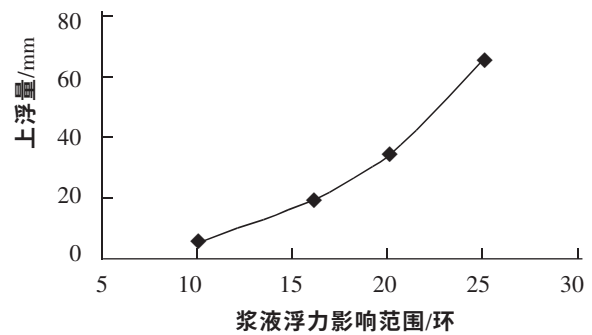


图 9 浆液浮力影响范围与上浮量之间关系图

Fig.9 Relationship between influence range of slurry size and tunnel upward movement

表 4 不同摩擦力对隧道上浮影响计算结果

Tab.4 Influence of different friction forces on tunnel upward movement

管片间轴力/kN	30 770	36 925	43 080	49 235	55 390	61 545	67 700	71 390
摩擦力/kN	6 154	7 385	8 616	9 847	11 078	12 309	13 540	14 278
隧道纵向剪力 F_s /kN	13 779	13 779	13 779	13 779	13 779	13 779	13 779	13 779
纵向螺栓剪力 F_s /kN	7 625	6 394	5 163	3 932	2 702	1 471	240	-499
上浮量/mm	49.8	40.2	27.9	18.5	10.5	4.3	0.5	不上浮

4 管片上浮力控制措施

在深切槽盾构施工中,由于覆土厚度较浅,管片在浆液浮力的作用下易出现上浮超限的风险,甚至可能造成管片不均匀变形,隧道上浮过大,管片螺栓剪断止水条失效漏水,覆土顶裂。针对以上问题可以采取以下措施:

1) 选择适当的注浆浆液及方法。比较理想的注浆方法让注浆浆液完全充填施工间隙并快速凝固形成早期强度,使隧道与周围土体形成整体构造物从而达到稳定。故本工程在同步注浆中采用惰性浆液,在深切

槽段时加大同步浆液的水泥含量,使浆液包裹管片后尽快凝固。

2) 控制盾构机姿态。深切槽段施工时考虑管片的上浮风险,将盾构姿态控制在水平 ± 40 mm,竖直 $-30\sim 0$ mm。由于预留一定空间,当隧道发生上浮时管片姿态仍然在可以接受范围内。

3) 控制掘进速度。如果在同步注浆过程中,浆液不能及时达到有效地固结和稳定管片的条件时,应适当控制盾构掘进速度。在深切槽段,控制掘进速度在每天 8 环以内。

4) 在盾构设计中管片环向螺杆 6.8 级,纵向螺杆 5.8 级,在深切槽段统一增加为 8.8 级同时使用摩擦系数更大的橡胶衬垫,使管片更加稳定。

5) 在浅覆土段管片拼装时全部增加剪力销安装,增加管片的抗剪抗浮力。

6) 加强隧道纵向变形的监测,并根据监测的结果进行针对性的注浆纠正。如调整注浆部位及注浆量,配制快凝及提高早期强度的浆液。

5 结论

本文通过对南京大直径越江隧道深切槽段上浮问题机理分析,探讨了影响大直径盾构隧道上浮的因素并进行数值模拟分析各因素敏感性,然后给出预防隧道上浮的处理措施。研究表明:

1) 通过设置不同的弹簧剪切刚度值,纵向连接螺栓的剪切刚度越大,相邻两环管片间错台量越小,隧道的最大上浮量越小。通过提高隧道纵向螺栓的剪切刚度可以有效控制施工期间隧道上浮;

2) 随着盾尾单环上同步注浆压力差的增大,隧道上浮量减小。但隧道上浮对同步注浆压力差敏感度不高,当注浆压力达到 0.6 MPa 时,隧道上浮量只减少 1/3,这主要是同步注浆压力差的影响范围有限,对隧道纵向剪力的影响较小;

3) 随着后配套系统重量的增大,隧道纵向螺栓承担剪力值会有所下降,隧道抗浮能力提高。适当控制掘进速度,降低浆液浮力影响范围,能够有效控制隧道上浮;

4) 隧道覆土越厚,掌子面水土压力越大,隧道管片间轴力越大,因此,隧道抗浮能力越强。在浅覆土施工过程中,由于盾构推力的减小很容易发生上浮。摩擦系数更大的橡胶衬垫以及预应力螺栓可以提高隧道管片间摩擦力,从而提高隧道抗浮能力。

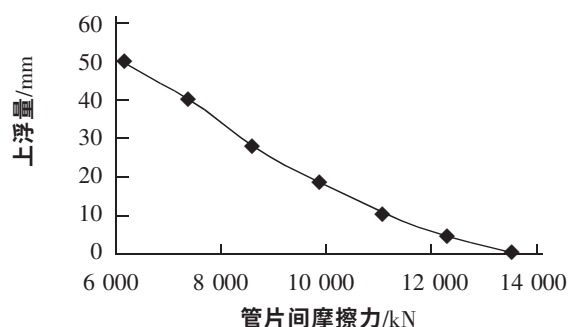


图9 管片间摩擦力与上浮量关系图
Fig.9 Relationship between friction and tunnel upward movement between segments

参考文献:

- [1] 沈鑫国,杨平,王许诺. 超大直径盾构隧道管片上浮原因与对策分析[J]. 南京工程学院学报:自然科学版,2011(1):26-31.
- [2] 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.
- [3] 袁文军,张少钦. 城市地铁越江隧道上浮引起的土体变形分析[J]. 现代隧道技术,2014(4):73-80.
- [4] 朱令,丁文其,杨波. 壁后注浆引起盾构隧道上浮对结构的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2012(S1):3377-3382.
- [5] 王新,李庭平,王印昌. 软土大直径泥水盾构隧道施工期上浮的控制措施[J]. 隧道建设,2014,12:1168-1174.

- [6] 杜闯东,王坤. 软弱富水地层大直径泥水盾构管片上浮与错台分析[J]. 隧道建设,2011(2):171-174+185.
- [7] 杨方勤. 超大直径泥水盾构隧道抗浮关键技术综述[J]. 地下工程与隧道,2011(2):1-5+56.
- [8] 杨方勤,段创峰,吴华柒,袁勇. 上海长江隧道抗浮模型试验与理论研究[J]. 地下空间与工程学报,2010(3):454-459.
- [9] 曹文宏,杨志豪,李冬梅. 盾构隧道上浮的力学机理研究[J]. 地下工程与隧道,2011(4):1-6+60.
- [10] 田华军,刘洪震. 武汉长江盾构隧道管片上浮控制技术[J]. 隧道建设,2009(3):364-366.

Mechanism Analysis and Control Study on Upward Movement in Deep Groove of Cross-River Tunnel

Lei Hecai

(China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Combined with the study on upward movement of shield tunnel in deep groove of Nanjing Cross-river Tunnel, this paper analyzes the upward movement mechanism and influencing factors of shield tunnel, then creates a shield tunnel beam-spring model by numerical simulation to simulate the upward movement of tunnel under construction and finally puts forward control measures against influencing factors. Research results show that the shorter the initial setting time of synchronous grouting is, the faster the driving speed is, and the greater the vertical shear stiffness, the self-weight of rear supporting system and pressure difference between synchronous grouting, which could make the upward movement period smaller in the tunnel construction. Besides, lowering shield posture ahead of time, utilizing rubber gaskets with larger friction coefficient and pre-stressed bolts can also control tunnel upward movement.

Key words: shield tunnel; cross-river tunnel; upward movement mechanism

(责任编辑 王建华)