

文章编号:1001-7372(2008)03-0076-05

考虑管片环间接头效应的盾构隧道 抗浮计算与控制分析

叶 飞¹, 朱合华², 丁文其²

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:为分析盾构隧道施工过程中的上浮问题,分别定义管片环间接头及上覆土产生抗浮作用为接头抗浮效应和上覆土抗浮效应。在考虑纵向螺栓预紧力和顶进千斤顶残余力产生的端面摩擦力,以及上覆土重力的前提下,分析了盾构隧道的抗浮计算式,并通过一具体实例对盾构隧道抗浮进行了计算。分析结果表明:该计算式将注浆压力、纵向螺栓的许用剪应力,以及上覆土的厚度联系起来,在上覆土厚度一定的条件下,能够计算出防止连接螺栓剪切破坏的最大注浆压力,在注浆压力一定的条件下,能够求出满足抗浮要求的最小上覆土厚度。

关键词:隧道工程;盾构隧道;理论分析;接头;管片;上浮;注浆

中图分类号:U451.4 **文献标志码:**A

Calculation for Anti-buoyancy and Control Analysis of Shield Tunnel Considering Effect of Joint of Segment Rings

YE Fei¹, ZHU He-hua², DING Wen-qi²

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi,

China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of

Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to analyze the upward-moving problem of shield tunnel in construction, the forces of resisting the upward-moving of the shield tunnel brought by joint of segment rings and overburden soil were defined as joint anti-buoyancy effect and overburden soil anti-buoyancy effect respectively. Considering the overburden and the friction force produced by prestress of longitudinal bolts and the remaining jack pressure between segment rings, the formula which was used to calculate the anti-buoyancy effect of shield tunnel was deduced, and a calculation example for anti-buoyancy of shield tunnel was given. Analysis results show that the formula combined the grouting pressure, allowable shear stress of the longitudinal bolts, and the overburden soil thickness. The maximal grouting pressure to prevent shear distress of the bolts could be calculated by the formula when the overburden soil thickness was given. The minimal overburden soil thickness could also be gotten to satisfy the anti-buoyancy requirement with a determined grouting pressure.

Key words: tunnel engineering; shield tunnel; theoretical analysis; joint; segment; upward-moving; grouting

收稿日期:2007-11-04

基金项目:国家高技术研究发展计划("八六三"计划)项目(2006AA11Z102)

作者简介:叶 飞(1977-),男,陕西石泉人,讲师,工学博士,E-mail:xianyefei@sohu.com。

0 引言

盾构隧道施工中,对于刚脱离盾尾的管片,经常会出现局部或整体上浮,表现为管片错台、裂缝、破损乃至轴线偏位等现象。文献[1]中提到:广州、上海、南京等地铁盾构施工注浆过程中,都不同程度地出现过管片脱出盾尾后的上浮现象,在某城市盾构施工中,管片脱出盾尾后,最大上浮量达170 mm。上海大连路隧道使用直径为11.22 m的泥水平衡盾构,在施工中,管片在出盾尾后即有上浮,在10环后达到最大值,平均上浮量约80 mm,但盾构机未见明显上浮。在上海翔殷路隧道施工中,发现了盾构机上浮现象。广州地铁三号线施工过程中局部管片上浮量也达到100 mm以上^[2]。为分析盾构隧道施工中的上浮问题,笔者对该问题作如下定义:盾构隧道施工过程中,在水压力、注浆压力、泥水盾构的泥浆压力,以及其他各种施工荷载作用下,发生的管片整体或局部的上移,或者盾构机械的上移现象,均为盾构隧道施工中的上浮问题。

对管片上浮原因,通常的看法是注浆浆液或泥浆、水等液体包裹住了刚脱离盾尾的管片,从而产生了向上的浮力,当该浮力克服了管片上覆土重力时,就有可能产生上浮现象;或是由于盾构施工中控制不当,产生了“蛇行”现象,从而造成管片局部向上偏位;也有通过数值计算来分析管片上浮效应的^[3]。对于接头对抗浮的作用问题,很少有文献提及。

鉴于接头在盾构隧道结构中举足轻重的作用,长期以来,盾构隧道管片接头一直是研究的热点和重点,对盾构隧道管片结构的研究在很大程度上都是对接头的研究,众多的理论分析、模型分析、数值计算、模型试验等都围绕管片接头展开^[4]。蒋洪胜等^[5]在对盾构法隧道管片接头进行理论分析的基础上建立了能够完整描述接头在任意组合力(弯矩、轴力及连接螺栓的预紧力)下的受力及变形性状的力学模型,并以上海地铁隧道管片接头为基础进行了力学分析,从管片接头角度提出了改进方案;黄钟晖^[6]在引入相应简化假设的基础上,建立了平面型纵缝接头的力学模型,根据该模型除了能得到衬砌二维计算所需的接头 M -曲线外,还能分析接头面的受力状态并得到接缝张开值;Lee等^[7-8]提出了考虑接头效应的横向设计方法,给出了通缝拼装情况下隧道横向抗弯刚度的有效性与各参数(隧道半径、管片厚度、地层抗力系数、接头刚度比等)关系的拟合公式。

笔者试图在分析上覆土抗浮作用的同时,考虑接头对抗浮的影响,并据此对上浮进行控制。将环缝接头的抗浮效应分为端面摩擦效应和螺栓抗剪效应,考虑在因注浆压力产生的上浮力作用下,环缝接头与上覆土共同抗浮,并据此分析得出抗浮计算式。

1 接头的抗浮效应

1.1 常见的管片接头

1.1.1 铰接头

铰接头一般多为转向接头结构,在地基条件良好的英国和俄罗斯得到广泛应用。由于该接头几乎不产生弯曲,轴向压力占主要地位,在良好的地基条件下是一种合理的结构。但在地基软弱、地下水位又高的日本和中国几乎从未被采用。为了防止从管片组装到壁后注浆硬化为止这段时间内的变形,最好在采用不损坏其结构特性的接头的同时,也采取防止变形的辅助手段。另外,此类结构不具备紧固力,所以对于地下水位以下的隧道,对防水要作特殊考虑。

1.1.2 销插入型接头

该接头主要作为管片环接头使用。管片环接头的主要功能是确保错缝接头组装时的拼接效应(从相邻管片上传递剪力),但从确保隧道轴向的连续性和防水观点出发,大多还需要锁紧功能和紧固力。

1.1.3 榫槽接头

榫槽接头结构主要作为管片环接头使用。在结构部位设有凹凸,通过凹凸部位的啮合作用进行力传递。用于环接头时,对组装精度要求较高,从而需要很好的施工管理。而且,从确保隧道轴向的连续性和防水观点出发,一般都要同时使用有紧固力的接头结构。

1.1.4 螺栓接头

螺栓接头结构利用螺栓将接头板(肋)紧固起来,是管片接头和管片环接头最为常用的接头结构。

管片采用螺栓连接时,根据连接螺栓的形状和插入方式可将连接方式分为直螺栓连接、曲螺栓连接和斜螺栓连接3种(图1),按照每对螺栓孔所用螺栓数量,又有单螺栓连接和双螺栓连接方式,其分类如图2所示。直螺栓接头施工方便,可有效减短螺栓长度,减少钢材使用量,同时管片接头部位能承担较大荷载,且便于施加预紧力,不足之处在于所需螺栓手孔较大,对管片截面削弱多,致使管片端头及侧肋的各种应力水平高,成为管片的薄弱部位。曲螺栓多用于平板形管片,其主要优点在于所需螺栓手孔小,对截面削弱少。试验表明,曲螺栓比直螺栓

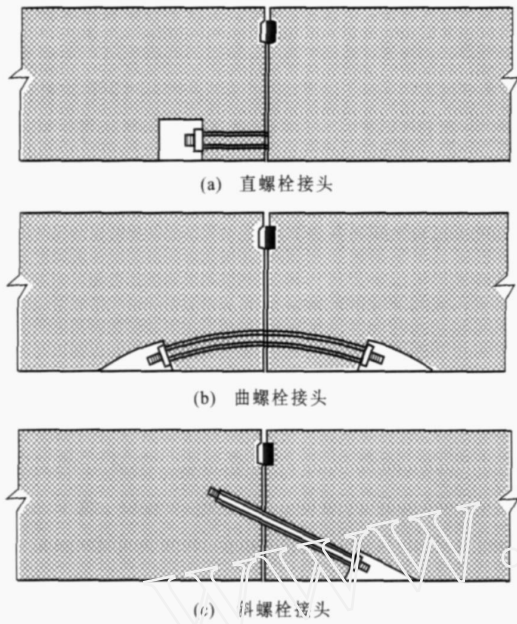


图1 螺栓接头的3种连接形式

Fig. 1 Three Connecting Types of Bolt Joints

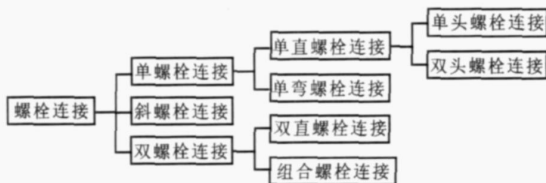


图2 螺栓连接形式分类

Fig. 2 Classification of Bolt Joint Types

更易变形,且施工不方便,材料消耗比较大,经济性差,并且在螺栓预紧力和地震作用下将对端头混凝土产生挤压作用,造成混凝土破坏,对结构的长期安全性不利。斜螺栓接头即销插入型接头,该接头方式作业效率高,对自动化施工的适应性很强。鉴于螺栓接头最为常见,本文中的分析主要针对螺栓接头展开。螺栓接头的抗浮效应主要通过2个方面实现:因螺栓预紧力产生的端面间摩擦力和螺栓自身的抗剪能力。

1.2 螺栓接头的抗浮效应

1.2.1 端面摩擦效应

环缝面上的摩擦阻力可按式(1)计算

$$f_c = \mu N_c \quad (1)$$

式中: f_c 为环缝面上的摩擦阻力; μ 为相邻管片环间的摩擦系数(可近似取0.3)^[9]; N_c 为管片环间接触压力,此处只针对环向接缝,因而该压力主要由纵向螺栓预紧力及顶进千斤顶传递的纵向压力共同构成,或写为

$$f_c = \mu \left(\sum_{i=1}^n N_i + N_j \right) \quad (2)$$

式中: N_i 为对每个纵向螺栓施加的预紧力; N_j 为千斤顶的顶进推力在计算环缝面上产生的残余压力,此残余压力在离盾构较远的管片环间的值比较小,Kawada经过实际工程量测后认为,在离盾构约20环处,该残余力变为0,可以忽略不计^[10]。同时,由于不可能保证接缝(尤其是环缝)整个表面同时接触,考虑端面摩擦效应时也需要一定程度的折减。

1.2.2 螺栓抗剪效应

依据材料力学原理,盾构隧道的壁厚 t 远小于其环向平均半径 R_a ,即满足

$$\frac{t}{R_a} < \frac{1}{10} \quad (3)$$

故环向可近似看作薄壁圆环截面,进而可认为剪应力沿壁厚方向均匀分布,且剪应力方向与圆周相切,如图3所示。

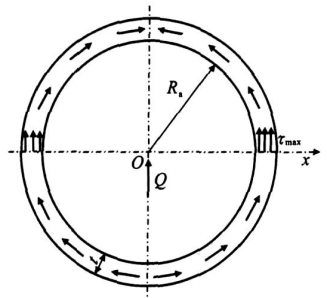


图3 管片环剪应力分布

Fig. 3 Shear Stress Distribution of Segment Ring

最大剪应力发生在中性轴上,其方向与受到的剪力方向平行,其值可用式(4)计算,即

$$\tau_{\max} = \frac{QS_{x\max}^*}{I_x b} \quad (4)$$

式中: Q 为管片环受到的剪力; b 为截面在中性轴处的宽度; I_x 为圆环对中性轴的惯性矩; $S_{x\max}^*$ 为半个圆环对中性轴的惯性矩。各参数分别为

$$b = 2t \quad (5)$$

$$I_x = \frac{1}{4} \left[\left(R_a + \frac{t}{2} \right)^4 - \left(R_a - \frac{t}{2} \right)^4 \right] \quad R_a^3 t \quad (6)$$

$$S_{x\max}^* = R_a t \frac{2R_a}{2} = 2R_a^2 t \quad (7)$$

代入式(4),得

$$\tau_{\max} = Q / (R_a t) \quad (8)$$

可见,管片环截面受到的最大剪应力为截面平均剪应力的2倍,发生在水平直径处。据此,笔者认为,在抗浮分析中,可将位于隧道横断面水平直径处的纵向螺栓作为抗浮计算的重点,即考虑该处螺栓受到的因上浮力产生的剪应力是否超过其允许剪应力,从而来验算其抗浮安全性。

2 上覆土的抗浮效应

本文中不考虑上覆土间的摩擦效应和拱效应,

认为仅有隧道宽度范围内的上覆土对管片上浮产生抵抗作用。事实上,上覆土的抗浮作用相当复杂,受其厚度、土质、施工扰动程度、地下水情况等诸多因素影响,应该分情况具体分析。计算时单纯将隧道宽度范围内的土体自重作为竖向荷载施加在隧道管片上,与管片自重一起构成向下的作用力,如图 4 所示。此时,上覆土产生的抗浮荷载可依据式(9)计算

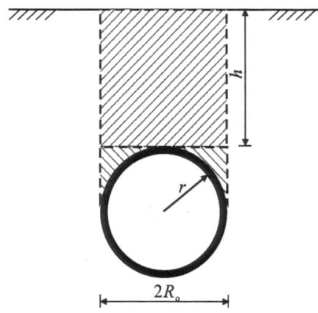


图 4 上覆土抗浮荷载作用
Fig. 4 Anti buoyancy Load Effect of Overburden Soil

$$F_r = W = [2R_0 h + (2 - \frac{1}{2}) R_0^2] \quad (9)$$

式中: F_r 为上覆土产生的抗浮荷载; W 为上覆土的重力; 为上覆土的有效重度(取饱和重度减水的重度); R_0 为管片外径; h 为管片之上土体高度。

3 上浮力计算

本文将盾构隧道管片上浮的原因主要归纳为 5 个方面: 因地下水、注浆浆液、泥浆等包裹管片进而产生上浮力(定义为静态上浮力)作用; 因注浆而产生的动态上浮力作用致使管片上浮,该上浮力伴随着盾尾管片壁后注浆的施工过程而产生,可能引起管片上浮、局部错台、开裂、压碎或其他破坏形式,因为其大小、分布形式等都与壁后注浆施工过程密切相关,是一动态变化的力,因而本文将该力定义为动态上浮力,其本质是一种注浆压力; 施工中盾构管片受到顶进千斤顶造成的纵向偏心荷载,致使管片纵向发生向上的弯曲变形; 泥水盾构掘进中,当使用较大的切口水压时,可能造成盾尾上抬,进而带动附近管片上浮; 隧道开挖卸荷导致的地基回弹作用,也可能造成盾构隧道的局部或整体上浮。

此处仅对上述原因 展开讨论,即讨论动态上浮力的计算。然而,笔者研究发现,该动态上浮力依据注浆压力、注浆时间、土质及浆液特性等的不同,浆液在周围土体中的扩散模式也有多种情况,各种情况下的浆液扩散范围及造成的动态上浮力差别很大。因此,具体工程分析计算中要依据土层及施工情况,确定浆液的扩散模式,进而确定因注浆产生的动态上浮力,所以,此处仅考虑最不利情况,即可能

产生的最大动态上浮力进行分析。

当浆液扩散方式为压密注浆,并且在管片环下部集聚时(图 5),可求得注浆压力形成的向上的合力,即上浮力为

$$PR_0 \cos d = 2 PR_0 \sin \quad 0 < < \frac{1}{2} \quad (10)$$

式中: P 为施工中所用注浆压力; 为注浆浆液分布区域边界与竖向的夹角。

4 抗浮计算

4.1 计算分析

依据上述分析,当对压密注浆阶段的动态上浮力进行抗浮计算时,依据式(2)、(9)、(10),得到在上浮力作用下,每环管片两端环缝处纵向螺栓受到的向上的剪力为

$$Q_b = 2B PR_0 \sin - \mu \left(\sum_{i=1}^n N_i + N_j \right) - [2R_0 h + (2 - \frac{1}{2}) R_0^2] - (R_0^2 - R_i^2) c \quad (11)$$

式中: Q_b 为螺栓受到的剪力; B 为动态上浮力作用的宽度; R_i 为管片内径; n 为环缝处纵向螺栓的根数; c 为钢筋混凝土的重度。

考虑到式(8),将该式中管片环截面的面积替换为纵向螺栓的总面积,得水平直径处(该处的剪应力最大)的纵向螺栓受到的剪应力为

$$b_{max} = \frac{Q_b/2}{n r_b^2/2} \quad (12)$$

式中: r_b 为螺栓半径。

联合式(11)、(12),得管片环水平直径处纵向螺栓受到的剪应力为

$$b_{max} = \{ 2B PR_0 \sin - \mu \left(\sum_{i=1}^n N_i + N_j \right) - B [2R_0 h + (2 - \frac{1}{2}) R_0^2] - B (R_0^2 - R_i^2) c \} / (n r_b^2) \quad (13)$$

依据螺栓的剪切破坏条件,即最大剪应力不超过其许用剪应力,得到这种条件下注浆压力的控制计算式为

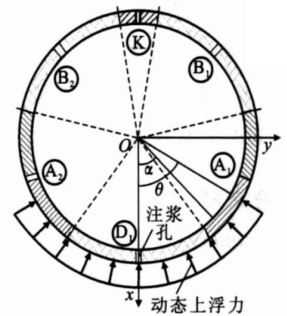


图 5 压密注浆阶段动态上浮力的形成
Fig. 5 Formation of Dynamic Upward-moving Force in Compaction Grouting Stage

$$P < \{ n \cdot r_b^2 [\sigma] + \mu \sum_{i=1}^n (N_i + N_j) + B [2 R_o h + (2 - \frac{1}{2}) R_o^2] + B (R_o^2 - R_i^2) c \} / (2 B R_o \sin \alpha) \quad (14)$$

式中： $[\sigma]$ 为螺栓的许用剪应力。当注浆压力一定时，也可以根据类似的分析确定上覆土的最小厚度。

表1 隧道的结构及材料性能参数

Tab.1 Structure of Tunnel and Parameters of Material Performances

R_o/m	R_i/m	n	r_b/m	$[\sigma]/Pa$	μ	N_i/N	N_j/N	B/m	$\alpha/(N \cdot m^{-3})$	$c/(N \cdot m^{-3})$	h/m
3.10	2.75	17	0.012	1.75×10^8	0.3	3 000	2.0×10^6	1	17 500	24 000	8

5 结 语

(1) 隧道上浮问题的产生与否不仅与管片自重、上覆土荷载以及受到的浮力大小有关，也与管片接头特性有关，如接头间摩擦力的大小、连接螺栓的直径及分布情况等。隧道抗浮控制既可以从改善上覆土性能，增加上覆土厚度入手，也可以从改善管片接头性能入手，诸如增加纵向螺栓数量、加大螺栓直径、加大螺栓预紧力等。同时，因水平直径处的螺栓受到的剪力最大，所以该位置处可以考虑加密布置。

(2) 管片抗浮控制可按文中的式(14)进行计算，但该式中有关参数的取值值得进一步研究和商榷。

参考文献：

References :

- [1] 王 晖,李大有,夏广红.盾构机盾尾注浆施工中存在的问题及其对策分析[J].苏州科技学院学报:工程技术版,2004,17(1):40-45.
WANG Hui, LI Da-yong, XIA Guang-hong. Analysis of Problems Arising from and Measures Taken in the Construction of Grouting at Tail of the Shield Machine[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2004, 17(1):40-45.
- [2] 沈征难.盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J].现代隧道技术,2004,41(6):51-56.
SHEN Zheng-nan. Analysis and Control of the Upward Moving of Tunnel Segments in the Process of Shield Excavation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(6):51-56.
- [3] BLOM C B, HORST E J, JOVANOVIĆ P S. Three-dimensional Structural Analyses of the Shield-driven "Green Heart" Tunnel of the High-speed Line South [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1999, 14(2):217-224.

4.2 实例验算

现假设某工程的结构及材料性能相关参数见表1。将表1中各参数值代入式(14)，取压密注浆的充填角度为 45° ，可求得此时可采用的最大注浆压力为0.70 MPa，若取压密注浆充填角度为 30° ，则可采用的最大注浆压力为0.49 MPa。

- [4] 凌贤长,王丽霞,吴立新.盾构施工触发隧道周围土体位移变化规律的数值模拟分析[J].中国公路学报,2003,16(2):78-81.

LING Xian-zhang, WANG Li-xia, WU Li-xin. Numerical Analysis of the Varying Law of Tunnel Surrounding Soil Displacement Produced by Shield Tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2):78-81.

- [5] 蒋洪胜,侯学渊.盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1574-1577.

JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. Theoretical Study of Rotating Stiffness of Joint in Shield Tunnel Segments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9):1574-1577.

- [6] 黄钟晖.盾构法隧道错缝拼装衬砌受力机理的研究[D].上海:同济大学,2001.

HUANG Zhong-hui. Research on Stagger-joined Segmental Linings Behavior of Shield-tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2001.

- [7] LEE K M, GE X W. The Equivalence of a Jointed Shield-driven Tunnel Lining to a Continuous Ring Structure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(3):461-483.

- [8] LEE K M, HOU X Y, GE X W, et al. An Analytical Solution for a Jointed Shield-driven Tunnel Lining [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics, 2001, 25(4):365-390.

- [9] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991:315-316.

LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield-driven Tunnels[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991:315-316.

- [10] DONDE P M, WANG J J. Shear Transfer Through Bolts in Segmental Tunnel Linings [C]// VIEITEZ-UTESA L, MONTANEZ-CARTAXO L E. Towards New Worlds in Tunnelling. Rotterdam: BAL KEMA A A, 1992:295-301.