

基于抗浮稳定的盾构隧道合理覆土厚度研究

刘学彦^{1,2},袁大军^{1,2},姜 曦³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学隧道与地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 3. 北京市市政工程设计研究总院, 北京 100082)

[摘要] 运用理论分析和数值计算相结合的方法,分别从施工期和运营期角度提出了隧道抗浮稳定合理覆土厚度设定原则和理论计算方法;对于隧道施工期,考虑土体侧向摩阻力和管片环间摩阻力的影响等较为有利因素,同时考虑未凝浆液的影响等不利因素,建立了合理覆土厚度的理论计算公式;对于隧道运营期,建议只考虑隧道上覆土体自重进行抗浮,对于存在洪水冲刷的隧道设计,其上覆土体厚度还要加上设计冲刷深度;为南京某在建隧道的纵断面设计提供了一定的参考,同时也为其他过江海盾构隧道满足抗浮稳定的覆土厚度设定提供理论支持。

[关键词] 抗浮安全;隧道施工期;隧道运营期;覆土厚度

[中图分类号] TB532;U211.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)01-0088-08

1 前言

随着地铁、城际铁路、城市快速通道的迅速发展,修建过江越海隧道成为一种趋势。在软土中修建过江越海隧道时,一般使用盾构法。由于受到地形和交通线路的影响,一般要求覆土厚度尽可能薄。但是,过薄的覆土厚度往往使得隧道本身不能满足抗浮要求,特别是断面较大的隧道,抗浮要求与线型布局的矛盾更为突出。因此,需要研究满足工程抗浮需求的合理覆土厚度,以便更好地服务于实际工程。Palmer等^[1]运用离心机试验和等尺寸试验研究了海底埋置管道的上浮阻力,并基于图1所示模型,得出无量纲上浮阻力的表达式。White等^[2]给出了图1所示模型的上浮阻力表达式。Cheuk等^[3]研究了砂土中管道上浮的力学机制,并给出了3种土体变形模型。这些研究给出了管道上

浮的力学特性,为隧道抗浮提供一定的参考。而盾构隧道抗浮稳定性能研究成果较少,但国内的一些学者进行了研究。叶飞等^[4]分析了隧道施工期上浮的原因,指出管片上浮是由多种因素作用造成的,并重点研究了螺栓接头的抗浮效应。杨方勤等^[5]进行了隧道模型上浮试验,建立了动态浮力密度曲线。戴小平等^[6]考虑上覆土体和周围土体之间的摩阻力,改进了最小埋深的计算方法。而在隧道运营期,隧道抗浮的影响因素较少,但也要考虑洪水冲刷等因素的影响。由于城市越江隧道刚刚兴起,大断面过江隧道的抗浮安全设计尚无统一的标准,考虑因素的种类和量值范围也没有定论。

因此,分别考虑隧道施工期和运营期工况,研究隧道的抗浮稳定,建立不同的分析方法,然后综合考虑选择合理覆土厚度,显得尤为重要。而直径14 m以上大盾构隧道的出现,使得隧道抗浮安全尤

[收稿日期] 2013-05-29

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51378054,51178027)

[作者简介] 袁大军,1961年出生,男,辽宁本溪市人,教授,博导,主要从事盾构隧道方面的研究工作;E-mail:yuandj603@163.com

为突出。所以本文选择直径为 14.5 m 的南京某在建隧道作为分析对象,以使理论更好地用于实际。

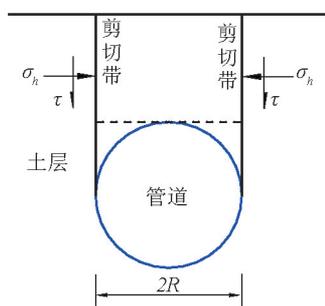


图1 竖向剪切带模型

Fig. 1 Vertical shear zone model

2 隧道抗浮计算的力学模型

2.1 隧道抗浮计算的一般力学模型

盾构隧道开挖后,受到周围土水压力、管片自重、上覆土重、同步注浆浆液压力的共同作用,会产生不同的力学反应。当管片受到向上的力较大时,隧道将发生上浮。假设单位长度上:管片所受浮力为 F_b ,隧道自重为 G ,隧道半径为 R ,覆土厚度为 d ,土体浮容重为 γ' ,建立力学模型如图2所示。

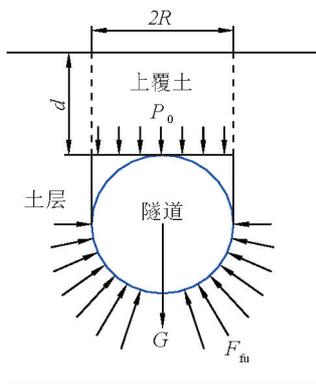


图2 隧道抗浮计算力学模型

Fig. 2 Mechanical model of anti-buoyancy property for tunnel

假设上覆土对下方土体和隧道压力为 P_0 ,若隧道满足抗浮力学稳定,则有:

$$P_0 \cdot 2R + G + (2 - \pi/2) \cdot R^2 \gamma' - F_b = 0 \quad (1)$$

隧道所受浮力由液体密度和隧道半径决定,而

隧道自重、半径,土体容重已知,因此,可以求出隧道抗浮稳定所需上覆土体压力为:

$$P_0 = (F_b - G - (2 - \pi/2) \cdot R^2 \gamma') / 2R \quad (2)$$

隧道上覆土体土压力按照太沙基理论土条法^[7]进行分析,并考虑土体侧向剪切阻力作用,力学模型如图3所示,其微分方程为:

$$\sigma_v \cdot 2R = (\sigma_v - d\sigma_v) \cdot 2R + \gamma' dz \cdot 2R + 2 \cdot (c + K\gamma' z \tan \varphi) \cdot dz \quad (3)$$

边界条件为: $z = d, \sigma_v = P_0$; $z = 0, \sigma_v = 0$ 。

式(3)中, K 为土体侧压力系数, $K = 1 - \sin \varphi$; c 为土体粘聚力; φ 为土体摩擦角。

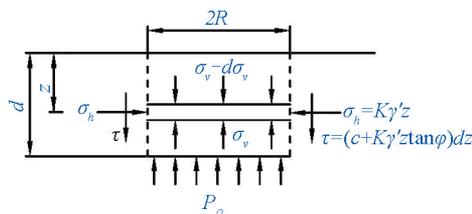


图3 土压力计算模型

Fig. 3 Mechanical model of earth pressure

由式(3)进行积分得出最小覆土厚度 d 的解答为:

$$d = \frac{\sqrt{(R\gamma' + c)^2 + 2R\gamma' K \tan \varphi P_0} - (R\gamma' + c)}{K\gamma' \tan \varphi} \quad (4)$$

2.2 施工期隧道抗浮计算的力学模型

在隧道施工期,盾构开挖后为保证管片拼装后的盾尾建筑间隙及时填充,将进行一定压力的同步注浆。而未凝浆液将产生更大的浮力,常常引起管片的局部上浮,导致管片拼装困难,盾构姿态恶化。为防止管片的局部上浮,需要适当的覆土厚度来满足隧道管片抗浮的力学条件。由于未凝浆液只作用于局部管片,管片环之间的环间摩擦力将发挥作用。考虑管片环之间只发生变形趋势,环间摩擦力由螺栓预紧力提供,如图4所示。则提供的摩阻力平均到单位长度上为:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu N_i / B \quad (5)$$

式(5)中, n 为一环管片环间纵向螺栓的数量; N_i 为每个纵向螺栓施加的预紧力; μ 为管片环间的摩擦系数; B 为管片环宽度。

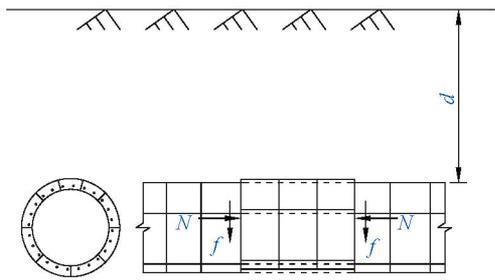


图4 局部管片上浮时受到摩擦力示意图
Fig. 4 Frictional resistance due to buoyancy of partial segments

此时,单位长度管片浮力作用在土柱底部的线荷载 P_s 计算式见式(6):

$$P_s = \frac{F_m - G - (2 - \pi/2)R^2\gamma' - \sum_{i=1}^n \mu N_i/B}{2R} \quad (6)$$

其中, F_m 为单位长度管片所受未凝浆液浮力。因此,施工期隧道抗浮稳定的覆土厚度为:

$$d_s = \frac{\sqrt{(R\gamma' + c)^2 + 2R\gamma'K \tan \varphi P_s} - (R\gamma' + c)}{K\gamma' \tan \varphi} \quad (7)$$

2.3 运营期隧道抗浮计算的力学模型

对于隧道运营期抗浮计算,由于设计年限较长,土体蠕变和长期不确定性因素较多,对隧道抗浮性能的有利因素,如土体侧向摩阻力,建议不再考虑。只运用隧道上方土体自重进行抗浮计算。在隧道运营期,纵向受力较为均匀,不再考虑螺栓预紧力的影响,考虑到内部铺装运营维护时可能拆除,计算时不再考虑其重量,作为安全储备。则运营期抗浮最小覆土厚度 d_y 为:

$$d_y = P_y / \gamma' \quad (8)$$

其中, P_y 为运营期单位长度管片浮力作用在土柱底部的线荷载:

$$P_y = (F_w - G - (2 - \pi/2) \cdot R^2 \gamma') / 2R \quad (9)$$

其中, F_w 为运营期管片所受水浮力。

2.4 隧道抗浮合理覆土厚度理论分析

假设隧道直径为 14.5 m,管片外径为 7.25 m,内径为 6.65 m,管片容重为 26.0 kN/m³,管片环宽为 2 m,螺栓预紧力为 30 kN,单环纵向螺栓数量 58 个,环间铺设橡胶防水胶条。混凝土间摩擦系数平均值为 0.31^[8],而橡胶与混凝土之间的摩擦系数远高于此^[9],保守取环间摩擦系数为 0.31。上覆土体容重为 18.4 kN/m³,摩擦角为 15°,粘聚力为 10 kPa,

同步注浆浆液密度为 17~20 kN/m³^[10],结合工程经验,考虑同步注浆系统的输送能力和浆液的填充效果,取浆液容重为 18 kN/m³。

施工期考虑浆液未凝工况,并考虑螺栓预紧力的影响。将参数代入式(6)和式(7)得:施工期满足抗浮要求的覆土厚度为 11.39 m;运营期考虑水浮力,并不再考虑螺栓预紧力的影响,考虑到内部铺装运营维护时可能拆除,计算时不再考虑其重量,作为安全储备。将参数代入式(8)和式(9)得:运营期满足抗浮要求的覆土厚度为 6.4 m。运用隧道抗浮计算一般力学模型,即考虑上覆土体侧向摩阻力的影响,运营期满足抗浮要求的覆土厚度为 5.19 m。

3 隧道抗浮安全的数值计算分析

3.1 运营期隧道抗浮安全数值分析

为了验证理论分析的合理性,同时分析隧道上浮过程中土体的变形特性,运用可以考虑大变形的 FLAC^{3D} 有限差分程序,考虑流固耦合,建立数值模型。由于施工期和运营期的抗浮要求有着不同的特点,需要建立不同模型进行分析。

运营期隧道纵向各段受力相对均匀,选取隧道长度 100 m 进行分析,建立模型如图 5 所示,为使计算结果具有对比性,使用参数与理论计算保持一致,其余计算参数见表 1。从图 6 可以看出,随着覆土厚度的减少,隧道上部土体的塑性区逐步发展,当覆土厚度为 6 m 时,其塑性区已经贯通。而其位移云图也显示,隧道上部土体的位移已达 0.16 m,发生了较大的变形,如图 7 所示。与仅利用上覆土体自重进行抗浮计算得出的覆土厚度为 6.40 m 较为一致。而使用考虑土体摩阻力的抗浮计算公式得出的覆土厚度偏于危险。

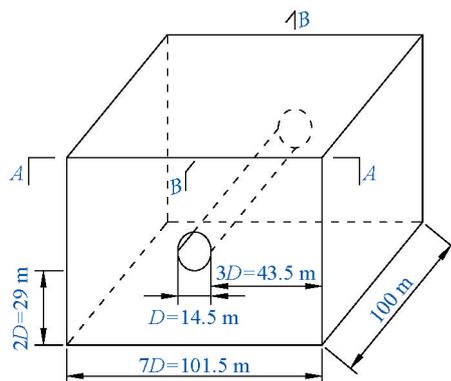


图5 模型尺寸示意图
Fig. 5 Size of three-dimensional model

因此可得:

$$\gamma_q = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot R^2 / (R - r_0)^2 + \gamma_w \quad (15)$$

由公式(13)和公式(14)知: a 值的变化对隧道上浮力的贡献为零,隧道上浮力只与浆液密度有关。也就是说,盾构开挖后,由于未凝浆液的作用,隧道外围的水土压力无论怎么变化,其对隧道上浮的贡献是一样的,与埋深无关,表现为浆液的浮力。当浆液容重为 18 kN/m^3 时,等效容重为 19.5 kN/m^3 。由于浆液所占体积较小,不再考虑浆液的体积。

浆液全凝条件下,由于无局部浆液浮力的影响,其力学模型实际上为运营期隧道受力模型。隧道在覆土厚度为 6 m 时,出现塑性区贯通,如图 6 所示。

考虑未凝浆液浮力作用时,环间摩阻力对阻止隧道局部上浮起到一定作用,表现为受浆液浮力管片区上浮较大,而远离浆液浮力区,其上浮位移逐渐减小,而非突然减小,如图 9 所示,图示为断面 A-A 和断面 B-B 的组合。

未凝浆液浮力越大,环间摩阻力对阻止隧道局部上浮的作用越大,表现为隧道上方土体位移梯度增大,如图 9 和图 10 所示。

随着覆土厚度的减小,未受未凝浆液局部浮力端的自稳能力变差,其提供的环间摩阻力变小,隧道上方土体均发生较大上浮,位移梯度减小,如图 10 和图 11 所示。

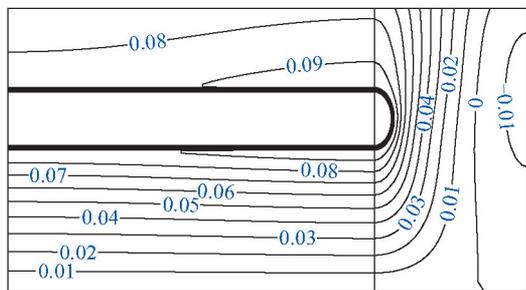


图 9 10 m 未凝浆液 16 m 覆土隧道周边土体
竖向位移(单位:m)

Fig. 9 Vertical displacement contours of soil around
tunnel with 16 m earth cover and 10 m
uncondensed mortar (unit: m)

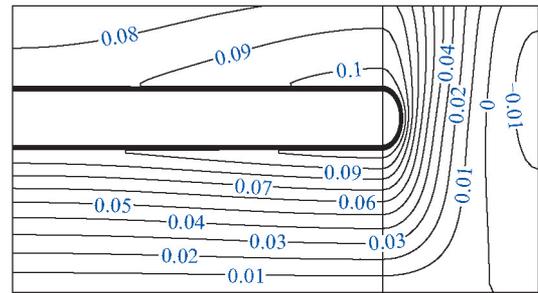


图 10 20 m 未凝浆液 16 m 覆土隧道周边土体
竖向位移(单位:m)

Fig. 10 Vertical displacement contours of soil around
tunnel with 16 m earth cover and 20 m
uncondensed mortar(unit: m)

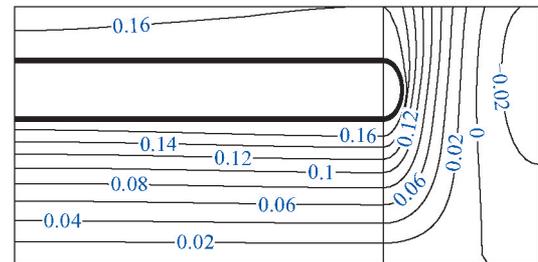


图 11 20 m 未凝浆液 10 m 覆土隧道周边土体
竖向位移(单位:m)

Fig. 11 Vertical displacement contours of soil around
tunnel with 10 m earth cover and 20 m uncondensed
mortar (unit: m)

由于 20 m 长度对于大直径隧道相当于 10 环或者盾构机一天的掘进长度。在一天的时间内浆液已发生部分凝结^[11]或完成主固结^[12],其浮力作用渐渐与水相同,因此,可以把 20 m 未凝浆液作为上浮计算的极限工况参考。

当覆土厚度为 12 m 时,其隧道上方地表最大上浮量已达 0.14 m ,如图 12 和图 13 所示。而隧道下方出现拉剪塑性区,如图 14 所示。于是,可以判断隧道上浮量超出了土体的弹性变形极限。所以,考虑土体变形影响,施工期其最小覆土厚度确定为 12 m 。与理论计算值 11.39 m 基本一致,验证了理论分析的可靠性和实用性。

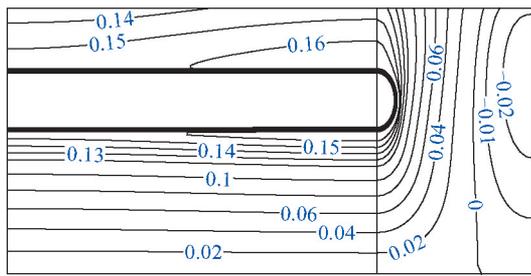


图12 20 m未凝浆液12 m覆土隧道周边土体
竖向位移(单位:m)

Fig. 12 Vertical displacement contours of soil around
tunnel with 12 m earth cover and 20 m uncondensed
mortar (unit: m)

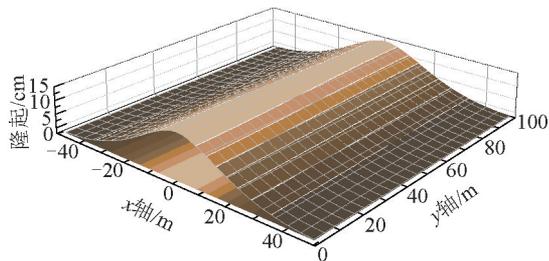


图13 20 m未凝浆液12 m覆土隧道上方地表隆起分布
Fig. 13 Upheaval of ground surface above tunnel with
12 m earth cover and 20 m uncondensed mortar

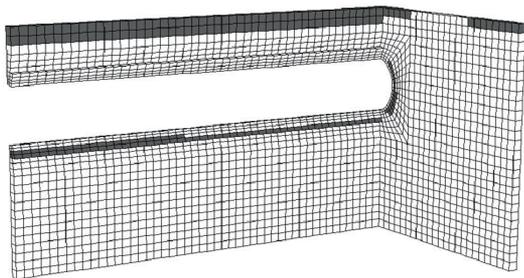


图14 20 m未凝浆液12 m覆土隧道周边塑性区分布
Fig. 14 Soil plastic zone around tunnel with 12 m earth
cover and 20 m uncondensed mortar

4 讨论

对于隧道运营期抗浮计算,由于隧道内铺装荷载有可能在隧道检修时拆除,所以分析时未考虑隧道内铺装荷载。在隧道设计条件苛刻情况下,可以考虑隧道内铺装荷载,但是,隧道检修时隧道内荷载不宜减少。对于土体性能对隧道抗浮性能的贡献,如土体侧向摩阻力,由于土体蠕变和长期不确定性因素的影响,建议不再考虑。只运用隧道上方

土体自重进行抗浮计算。若隧道位于陆地或海洋下方,隧道上方土体不考虑洪水冲刷的影响,则运营期抗浮最小覆土厚度 d_y 为:

$$d_y = P_y / \gamma' \quad (16)$$

其中, P_y 为运营期单位长度管片浮力作用在土柱底部的线荷载:

$$P_y = (F_w - G - (2 - \pi/2) \cdot R^2 \gamma') / 2R \quad (17)$$

其中, F_w 为运营期管片所受水浮力。

若隧道位于江河下方,隧道上方考虑洪水冲刷的影响,则运营抗浮最小覆土厚度 d_{yh} 为:

$$d_{yh} = P_y / \gamma' + h_0 \quad (18)$$

隧道施工期过程相对短暂,可以考虑土体侧向摩阻力和管片环间摩阻力的影响等较为有利因素,但是也要同时考虑未凝浆液的影响等不利因素。则施工期抗浮最小覆土厚度 d_s 为:

$$d_s = \frac{\sqrt{(R\gamma' + c)^2 + 2R\gamma' K \tan \varphi P_s} - (R\gamma' + c)}{K\gamma' \tan \varphi} \quad (19)$$

其中, P_s 为施工期单位长度管片浮力作用在土柱底部的线荷载:

$$P_s = \frac{F_m - G - (2 - \pi/2)R^2\gamma' - \sum_{i=1}^n \mu N_i / B}{2R} \quad (20)$$

其中, F_m 为单位长度管片所受未凝浆液浮力。

在隧道施工期间,盾构开挖产生的建筑间隙、注浆效果等也是隧道上浮的主要因素。而隧道施工期的最小覆土厚度是满足隧道抗浮稳定的力学条件,即是必要条件。若隧道施工期不满足最小覆土厚度要求则隧道一定上浮。当隧道设定覆土厚度满足最小覆土厚度要求时,也要保证盾构开挖产生的建筑间隙及时填充并稳定,才能使隧道管片不发生上浮。

5 隧道抗浮稳定的覆土厚度确定

考虑地铁、输水、城际铁路和城市快速通道等不同用途,选择盾构隧道直径大小为6~15 m作为研究对象。取管片重度 26 kN/m^3 ,浆液重度 18 kN/m^3 ,水的重度 10 kN/m^3 ,环间摩擦系数为0.31,螺栓预紧力为30 kN。隧道直径为15 m时,选择管片厚度0.6 m、环宽2.0 m,纵向连接螺栓58个;隧道直径为6 m时,选择管片厚度0.3 m、环宽1.2 m,纵向连接螺栓16个,其他直径使用内插法确定。计算使用土体参数如表1所示,代入式(16)至式(20)进行计算分析,结果如图15所示。

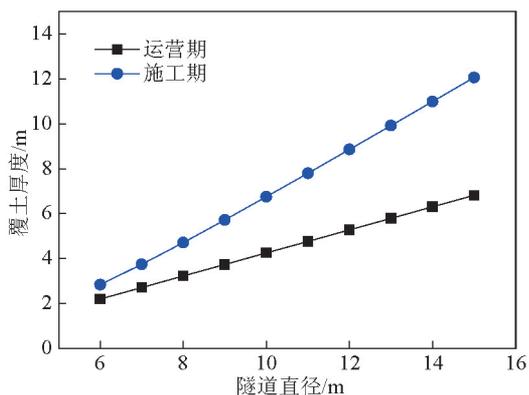


图15 不同直径隧道抗浮安全所需覆土厚度

Fig. 15 Depth of earth cover required for anti-buoyancy security of tunnel with different diameters

从图15可以看出,随着隧道直径的增大,其满足抗浮稳定的覆土厚度越来越大。满足运营期抗浮稳定要求的覆土厚度基本为 $0.5D$ (D 为隧道直径);而满足施工期抗浮稳定的覆土厚度则随着隧道直径的增大逐渐增大,从开始的 $0.5D$ 逐渐接近于隧道直径。

所要指出的是,图15是在直径变化而其他所有条件不变的情况下计算出的覆土厚度。其计算值可以作为定性分析,比如施工期隧道稳定比运营期隧道稳定需要的覆土厚度要大。而要定量分析,还需要结合具体的地质、地形和水文条件。同时维持隧道抗浮安全需要的覆土厚度设定需要注意以下几点。

1)在许可条件下,隧道抗浮稳定覆土厚度设定要同时考虑施工期抗浮稳定和运营期抗浮稳定、洪水冲刷等因素综合设定,设定值取其中较大者。隧道抗浮设计时,一般应满足公式(16)至公式(20)。

2)在苛刻条件下,隧道抗浮稳定覆土厚度设定也必须满足洪水冲刷条件下(有则必须考虑)运营期抗浮稳定。施工期抗浮稳定则可运用施工荷载进行平衡。

3)存在始发竖井、风井等结构物条件下,隧道覆土厚度可适当降低。

4)特殊条件下,如浅覆土段很短,隧道上方有其他构筑物等则应进行专门研究。对于隧道抗浮稳定性较差者,可以局部增加覆土厚度、改良土体或采用内部压重等方法进行研究分析后加以运用。

6 结语

本文从施工期和运营期角度,在理论分析的基础上,针对隧道抗浮安全的覆土厚度进行了数值对比分析,验证了理论计算公式的可行性和适用性,并得出了以下结论。

1)对于隧道施工期,考虑土体侧向摩阻力和管片环间摩阻力的影响等较为有利因素,同时考虑未凝浆液的影响等不利因素,建立了理论计算公式。

2)满足隧道施工期抗浮稳定的覆土厚度设定,只是保证隧道施工期抗浮稳定的力学条件,要使施工期隧道不发生上浮则还要保证盾构开挖产生的建筑间隙及时填充并稳定。

3)对于隧道运营期,由于土体蠕变和长期不确定性因素的影响,建议只考虑隧道上覆土体自重进行抗浮计算。

4)分别从施工期和运营期角度提出了隧道抗浮稳定合理覆土厚度设定原则和理论计算方法,并运用数值分析进行了验证。可以为盾构隧道满足抗浮稳定的覆土厚度设定提供理论支持。

5)需要指出的是,隧道抗浮稳定只是盾构隧道覆土厚度设定关键条件之一,其他影响覆土厚度设定的关键条件还包括盾构掘进等。

参考文献

- [1] Palmer A C, White D J, Baumgard A J, et al. Uplift resistance of buried submarine pipelines: Comparison between centrifuge modelling and full-scale tests[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(10): 877-883.
- [2] White D J, Cheuk C Y, Bolton M D. The uplift resistance of pipes and plate anchors buried in sand[J]. *Geotechnique*, 2003, 58(10): 771-779.
- [3] Cheuk C Y, White D J, Bolton M D. Uplift mechanisms of pipes buried in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(2): 154-163.
- [4] 叶飞,朱合华,丁文其.考虑管片环间接头效应的盾构隧道抗浮计算与控制分析[J].*中国公路学报*, 2008, 21(3): 76-80.
- [5] 杨方勤,段创峰,吴华荣,等.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, 6(3): 454-459.
- [6] 戴小平,郭涛,秦建设.盾构机穿越江河浅覆土层最小埋深的研究[J].*岩土力学*, 2004, 27(5): 782-786.
- [7] 陈若曦,朱斌,陈云敏,等.基于主应力轴旋转理论的修正Terzaghi松动土压力[J].*岩土力学*, 2010, 31(5): 1402-1406.
- [8] 冯忠居,任文峰,谢富贵,等.公路路基特长箱涵顶进模拟试验[J].*交通运输工程学报*, 2007, 7(4): 74-78.
- [9] 王可良,刘玲,隋同波,等.坝体岩基-橡胶粉改性混凝土现场抗剪(断)试验研究[J].*岩土力学*, 2011, 32(3): 753-756.
- [10] 赵天石. 泥水盾构同步注浆浆液试验及应用技术研究[D]. 上

海:同济大学,2008.
[11] 钟小春,左佳,刘泉维,等. 地层中粉细砂在盾构壁后注浆中的再利用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增): 293-296.

[12] 苏万鑫,谢康和. 非饱和土一维固结混合流体方法的解析分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2661-2665.

Research on depth of earth cover for shield tunnel anti-buoyancy security

Liu Xueyan^{1,2}, Yuan Dajun^{1,2}, Jiang Xi³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute, Beijing 100082, China)

[Abstract] The depth of earth cover for tunnel anti-buoyancy security during construction and operation was analyzed in this paper with theoretical and numerical methods. The principles and theoretical analysis methods were proposed for it. The formula of depth of earth cover for anti-buoyancy security of tunnel during construction was given for the first time. It involves the unfavorable factors, such as uncondensed mortar, the favorable factors, such as resistances of soil and segments. The weight of earth cover for tunnel was suggested to consider as unique factor for tunnel security during operation. The eroded depth for design should be considered for tunnel influenced by floods. It has provided some references for longitudinal section design of the tunnel in construction under the Yangzi River in Nanjing. And it also provided theoretical foundation for the set depth of earth cover for anti-buoyancy security of other shield tunnels under river or sea.

[Key words] anti-buoyancy security; tunnel construction period; tunnel operation period; depth of earth cover