

文章编号: 1005-0523(2017)02-0010-10

# 冲刷线下的杭州越江隧道抗浮分析

杨 超

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 钱塘江洪水冲刷河床与大潮回淤交替出现, 钱塘江洪水冲刷线下的隧道抗浮安全直接影响隧道埋置深度, 如何在保证施工及运营安全、降低造价的前提下确定合理的埋深, 是工程亟需解决的问题。通过研究对比各种工况下隧道抗浮受力模式的适用性, 并以杭州地铁4号线穿越钱塘江隧道为例进行计算分析, 得出如下结论: 隧道抗浮埋深主要受使用阶段冲刷线控制, 抗浮计算可采用一般常用的重力抗浮模式, 上覆土3 m满足抗浮安全; 另外对施工阶段遭遇300年一遇的洪水冲刷河床的特殊情况进行分析, 考虑隧道螺栓剪切抗浮作用后可提高隧道的抗浮力, 同时可从浆液初凝时间、注浆工序、螺栓设计等方面考虑提高抗浮安全性。

**关键词:** 越江隧道; 冲刷线; 抗浮

中图分类号: U455.43 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.002

在城市地铁规划过程中, 由于线路走向、地理环境等因素的制约, 盾构不可避免需要穿越大江大河等特殊水下区域, 形成越江隧道。对于越江隧道, 由于隧道使用线路上的因素限制, 车站埋深限制、造价因素等, 隧道不能无限制的加大埋深, 而对于较深的河底, 或河底冲刷线, 可能使其所处位置的上覆土层较浅, 出现超浅覆的情况。通过查阅相关文献, 表1中列举了国内外一些典型的浅覆土越江隧道<sup>[1-5]</sup>, 从表中可以看出, 对于越江隧道, 其覆土厚度小于1倍隧道直径的情况比较普遍。

隧道在覆土厚度比较薄同时水源补给充分的条件下, 盾构机或管片达不到抗浮稳定要求而产生向上位移, 导致盾构顶部挤压上覆土体而产生隆起变形, 甚至透水裂隙, 此为越江盾构隧道的上浮。隧道上浮可能会带来开挖面流沙管涌、盾构土仓渗漏水、衬砌环端部压碎、连接螺栓拉断等连锁事故。所以, 为保证盾构隧道有足够的抗浮能力, 工程设计要求隧道在施工开挖期间及长期运营期间其上部都必须要有足够的覆土厚度。对于施工阶段及使用阶段的覆土要求计算不同, 施工阶段要求在盾构施工顶推力、注浆压力等情况下上方土体保持稳定, 不产生过大的隆起, 关注的焦点集中在上覆土, 而使用阶段则主要是盾构隧道抗浮受力的稳定性, 关注的焦点集中在隧道自身。对于杭州钱塘江越江隧道, 一般施工工况下, 覆土厚度可以保证, 主要是在运营阶段的冲刷状况下, 需满足隧道的抗浮要求。

目前对于满足隧道抗浮要求的最小覆土厚度的确定我国规范还没有做出明确的规定, 但要求当覆土厚度小于1~1.5倍的开挖直径的情况下, 必须进行抗浮验算。

## 1 抗浮计算方法

根据《地铁设计规范》(GB 50157-2013)11.6.1第6条及11.6.3条文说明要求, 结构设计应按最不利情况进行抗浮稳定性验算, 隧道抗浮需满足下式要求:

收稿日期: 2016-09-12

作者简介: 杨超(1986—), 女, 工程师, 研究方向为地铁盾构隧道。

$$F_{抗}/F_{浮} > K \quad (1)$$

其中: $F_{抗}$ 为隧道受到的抵抗浮作用力; $F_{浮}$ 为隧道受到的上浮作用力; $K$ 为抗浮安全系数,当不计地层侧摩阻力时为 1.05;当计及地层侧摩阻力时,根据不同地区的地质和水文地质条件,可采用 1.10~1.15 的抗浮安全系数,抗浮安全系数目前没有统一规定,宜参照类似工程,根据各地的工程实践经验确定上海地铁取 1.10,摩阻力采用值根据实践经验决定,考虑软粘土的流变特性,一般取极限摩阻力的一半,广州、南京、深圳、北京地铁取 1.15,摩阻力采用标准值(极限值)<sup>[6]</sup>。对于沉管按一般情况下, $F_{抗}$ 可简单取值为隧道上覆土重及自重之和; $F_{浮}$ 可取值为隧道在水中所受的浮力。但实际情况却往往比较复杂,施工阶段与长期使用阶段、浅覆土与厚覆土、软粘土与硬岩土等不同工况下隧道抗浮作用模式都不尽相同,另外管片与管片之间、管片与土层之间、土层与土层之间皆有相互作用力,这又让隧道抗浮作用模式变的更为复杂。

表 1 国内外典型浅覆土越江隧道  
Tab.1 Cross-river tunnel of typical shallow overburden soil at home and abroad

序号	隧道	隧道外径 $D/m$	最小覆土厚度 $h/m$	覆跨比 $H/D$
1	德国易北河公路隧道	12.33	7.0	0.57
2	日本东京湾公路隧道	14.14	7.3	0.52
3	日本关门司铁路隧道	7.0	9.5	1.36
4	丹麦多贝尔特大海峡铁路隧道	8.5	13.0	1.53
5	南京秦淮河地铁越江隧道	6.4	0.97	0.12
6	南京三江口输气隧道	4.2	4.77	1.14
7	上海外滩观光隧道	7.48	5.67	0.76
8	上海延安东路北线公路隧道	11.3	5.8	0.51
9	上海延安东路南线公路隧道	11.22	6.0	0.53
10	武汉长江公路隧道	11.0	6.8	0.62
11	上海翔殷路越江公路隧道	11.58	6.9	0.60
12	广州地铁四号线穿越新造海区隧道	6.0	8.37	1.40
13	杭州地铁一号线穿越钱塘江隧道	6.2	3.5	0.56
14	杭州地铁二号线穿越钱塘江隧道	6.2	4.0	0.65
15	杭州庆春路穿越钱塘江公路隧道	15	9.5	0.63
16	长沙南湖路湘江公路隧道	11.3	7.0	0.62

注:1. 杭州 3 处越江隧道最小覆土厚度均指隧道顶与钱塘江 300 年一遇冲刷线的距离,而非施工阶段隧道与江底的距离。

2. 盾构穿越秦淮河采用加设抗拔桩和抗浮板并进行河底注浆的加固方法。

下面归纳目前各研究学者提出的  $F_{抗}$  与  $F_{浮}$  可能的几种计算方法。

### 1.1 上浮力 $F_{浮}$ 计算方法

盾构隧道管片上浮的原因可主要归纳为以下几个方面<sup>[7-8]</sup>:① 地下水浮力,这也是最主要的上浮力;另外盾构施工阶段还将产生如下上浮力;② 包裹管片的注浆浆液未凝固前引起的浆液浮力;③ 注浆压力不均匀引起管片上浮力;④ 由施工阶段千斤顶顶推力不均匀而引起的纵向偏心荷载;⑤ 泥水盾构掘进中使用较大的切口水压时可能引起的盾尾附近管片上浮;⑥ 隧道自身开挖或隧道上方的基坑开挖等工况对隧道结

构产生土体卸载效应。

1) 水浮力。盾构包围在地下水中将受到水的浮力作用。水浮力为永久上浮力,单位长度管片在水中受到的水浮力为

$$F_{浮动} = \pi R^2 \gamma_w \quad (2)$$

其中: $R$  为管片外径; $\gamma_w$  为水重度。

2) 浆液浮力。盾构施工时管片及开挖面间因超挖存在间隙,要求及时进行同步注浆以防止地面产生过大沉降。当管片结构脱离盾尾后且浆液凝固前会受到较大的浆液上浮力作用<sup>[6]</sup>,这个上浮力为施工注浆阶段的临时上浮力。单位长度管片受到的浆液上浮力为

$$F_{浮浆} = \pi R^2 \gamma_g \quad (3)$$

其中: $\gamma_g$  为注浆重度。由于浆液重度较水大,其上浮力也比水浮力大。

3) 注浆压力引起的上浮力。注浆压力引起的上浮力与注浆的位置相关,根据不同的注浆位置模式,上浮力主要包括以下几种<sup>[9]</sup>:

- 1) 三角形分布模式,当注浆位置位于隧道下半环时,引起上浮力,如图 1(a)所示。
- 2) 扇形分布模式,隧道下半环扇形注浆,如图 1(b)所示,单位长度管片上浮力为<sup>[9]</sup>

$$\int_{-\theta}^{\theta} PR \cos \alpha d\alpha = 2PR \sin \theta \quad (0 < \theta < \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

其中: $P$  为施工时注浆压力; $\theta$  为浆液分布区域在管片上的角度大小。

3) 整体均匀分布,全环管片均匀注浆,不引起上浮力,如图 1(c)所示。

4) 整体非均匀分布,全环管片注浆,但下半环压力大于上半环,引起上浮力,如图 1(d)所示。

### 1.2 抗浮力 $F_{抗}$ 计算方法

越江隧道抗浮力的计算主要分为两部分:一是隧道上方覆土的抗浮作用力,二是隧道衬砌管片自身的抗浮作用力,也可考虑侧壁与地层之间的摩阻力。应注意抗浮力是随施工过程及使用阶段不断变化的。

#### 1.2.1 上覆土抗浮力 $F_1$ 。

在盾构隧道抗浮计算中,隧道上方覆土的抗浮作用力为其最主要作用力,直接影响隧道的抗浮计算安全,现有的上覆土抗浮效应主要考虑覆土的重力作用、摩擦作用及土拱作用,具体分为以下几类:

1) 仅考虑重力作用。抗浮计算时,不考虑上覆土体的摩擦作用及土拱作用,仅考虑隧道直径范围内的上方覆土重力作用,简化计算时可仅考虑隧顶以上的覆土,当埋深浅时,还可考虑隧道供腰以上的覆土,如图 2 所示。

重力作用模式下的上覆土抗浮荷载为

$$F_1 = \gamma' [2Rh + (2 - \frac{\pi}{2})R^2] \quad (5)$$

其中: $R$  为隧道外径; $\gamma'$  为上覆土浮容重。

2) 考虑侧向摩擦作用。当隧道管片埋深较大或处于比较好的地层,还可考虑上浮土体与周围静止土体的摩擦作用对抗浮的影响,该摩擦力由侧向静止土压力提供,作用模式如图 3 所示<sup>[11]</sup>。

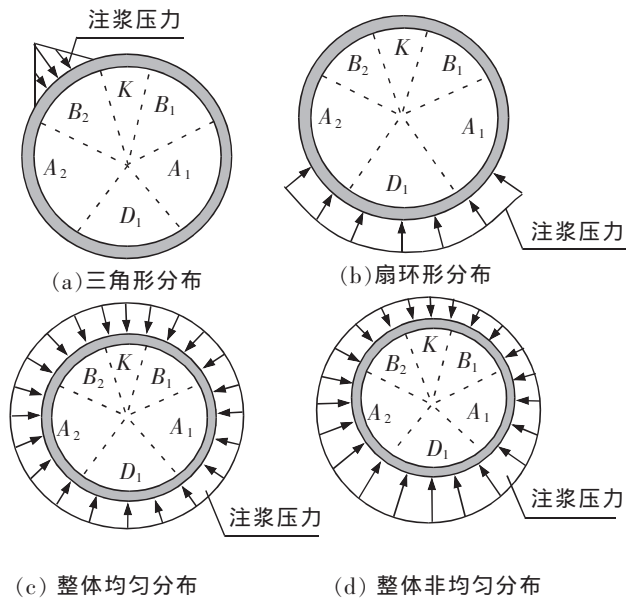


图 1 注浆压力分布模型

Fig.1 Grouting pressure distribution model

考虑土体重力+摩擦作用的上覆土抗浮荷载为

$$F_i = \gamma' [2Rh + (2 - \frac{\pi}{2})R^2] + (h+R)[2c + k\gamma' (h+R)\tan\varphi] \quad (6)$$

其中: $\varphi$  为土的内摩擦角; $c$  为土的粘聚力; $k$  为侧向静止土压力系数。

盾构施工时对隧道直径 1 D 的范围内的土体容易产生扰动,土体强度存在一定程度地降低。因此,从工程安全的角度上看,一般不考虑这种约束作用。

3) 考虑土拱作用。普罗托吉雅柯诺夫教授提出的“塌落拱”模型认为隧道覆土达到一定深度,开挖后,顶部土体失去稳定产生塌落拱。塌落拱以内的土体自重由隧道承担,塌落拱以外的土体自重由塌落拱承担。作用模型如图 4 所示<sup>[12]</sup>。

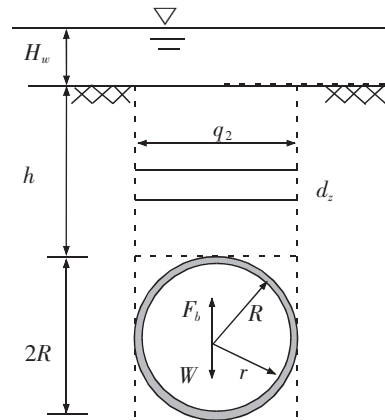


图 2 重力作用  
Fig.2 Gravity action

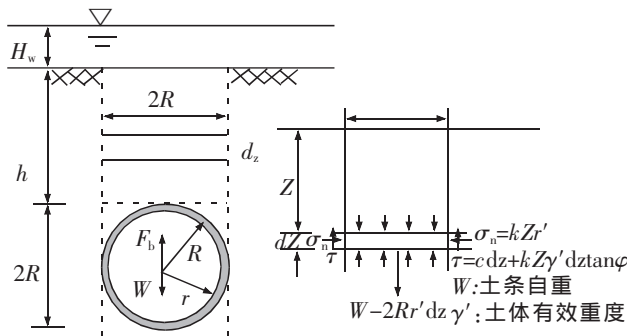


图 3 改进土柱分析模式  
Fig.3 Improved soil column analysis model

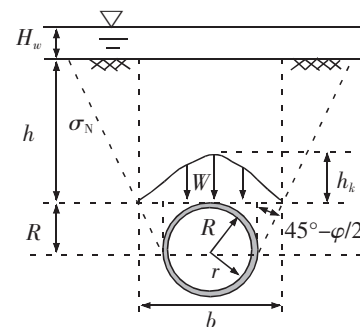


图 4 普氏“塌落拱”作用模式  
Fig.4 Promojyafakonov's theory analysis model

普氏塌落拱的跨度与高度公式如下:

$$b = 2R + 2R \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (7)$$

$$h_k = b / 2f \quad (8)$$

式中: $b$  为普氏塌落拱跨度; $h_k$  为普氏塌落拱高度; $f$  为普氏系数,  $f = fc/10$ ;  $fc$  为岩石单轴极限抗压强度。

该作用模式下的隧道上方抗浮荷载为塌落拱高度以内的土体自重:

$$F_i = \gamma' h_k \quad (9)$$

该作用模式适用于破碎、松散的围岩或砂质地层中,软土中不适用。另外产生“塌落拱”时隧道埋深一般大于 1 倍洞径,此时隧道抗浮一般满足要求,因此隧道抗浮计算一般不建议采用此理论模式,该理论模式在山岭隧道中计算隧道上覆土压力时应用较广。

4) 考虑隧道两侧土体作用。比尔鲍曼认为盾构隧道开挖一段时间后,隧道两侧一定范围内的土体压力也将均匀作用在隧道上方,加大隧道的抗浮作用,另外该作用模型也考虑了两侧土体的摩擦作用,但需适当折减。作用模型如图 5 所示<sup>[13]</sup>。比尔鲍曼分析模式更适合跨度大、土体松散软弱、建成一定时间的隧道工程。

该作用模式下的抗浮荷载为

$$F_f = \gamma' b_i h + 2 \int_2^h [c + \gamma' z \tan^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \tan(45^\circ - \varphi/2)] dz \tan \varphi \quad (10)$$

其中:  $b_i$  为隧道上方土体压力宽度, 大于隧道直径,  $b_i = 2R + 2R \tan(45^\circ - \varphi/2)$  (11)

### 1.2.2 管片抗浮力

盾构管片通过环向螺栓将管片块与块(一般为6块)连接成整环,再由纵向螺栓将环与环连接成隧道。当部分管片所受上浮力大于自重及土体摩擦力时,管片上浮环及相邻非上浮环之间接触面的摩擦力首先参与抵抗上浮;当考虑此摩擦力也达不到抗浮效果时,管片上浮环及相邻非上浮环之间螺栓会受到剪切作用。综上,管片的抗浮作用包括以下3方面:

1) 管片自重抗浮作用。管片自重的抗浮荷载如下:

$$W_g = \pi(R^2 - r^2)\gamma_c \quad (12)$$

其中:  $\gamma_c$  为管片自重。

对于运营中的隧道,其自重还可将隧道中其他长期存在的设施自重  $W_s$  考虑进来,如道床、轨道、管线及其支架、疏散平台、接触网等。

2) 管片环缝面间摩阻力抗浮作用。环缝面间的摩阻力抗浮荷载如下<sup>[14]</sup>:

$$f_c = \mu \left( \sum_{i=1}^N N_i + N_j \right) \quad (13)$$

式中:  $\mu$  为管片环与环间的摩阻力系数,计算时可按0.6考虑;  $N$  为管片环与环间纵向连接螺栓个数;  $N_i$  为施工时对纵向螺栓施加的预紧力,预紧力越大,摩阻力越强,计算时可按2 kN考虑;  $N_j$  为千斤顶顶推力在环缝面上的残余压力, Kawada 经过实际量测后认为,离拼装盾构大约20环处,残余力为0,可忽略不计<sup>[15]</sup>。另外,由于管片施工误差、拼装等原因不保证整个环缝表面同时接触,考虑环缝摩擦效应时需要进行折减。

3) 纵向螺栓剪切抗浮作用。连接管片的纵向螺栓与孔壁之间将预留一定的间隙,(如杭州地铁管片螺栓孔壁直径39 mm,螺栓直径30 mm),允许管片间发生一定的错台,当上浮错台量大于该间隙之后,螺栓受到孔壁挤压产生剪切作用。

螺栓的抗剪作用提供的抗浮荷载为<sup>[3]</sup>

$$F = n A_b [\tau] \quad (14)$$

式中:  $n$  为纵向最先参与剪切的螺栓;  $A_b$  为螺栓有效面积,  $[\tau]$  为螺栓抗剪强度。

### 1.3 抗浮计算方法适用情况

上面详细介绍了隧道计算抗浮时需要考虑的各种受力模式,然而各模式都有其一定的适用范围,并非任何情况都可套用,抗浮计算各受力模式适用情况详见表2,设计分析时可根据实际工程情况选用:

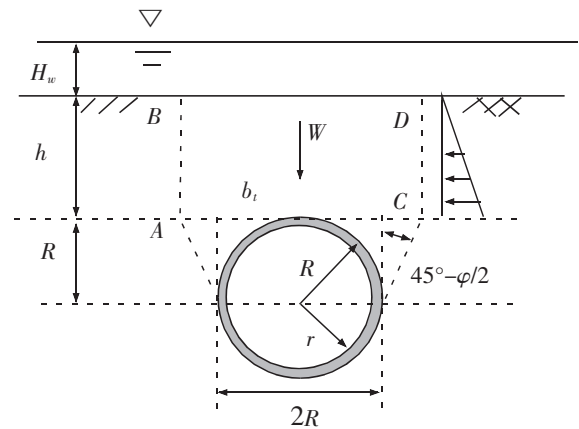


图5 比尔鲍曼作用模式  
Fig.5 Bauman Bill's theory analysis model



表 2 抗浮计算各受力模式适用情况  
Tab.2 The applicable conditions of each force mode of anti-floating calculation

抗浮受力模式		适用情况
上浮力	水浮力	普遍适用
	浆液浮力	盾构施工阶段浆液为流动状态
	注浆压力	注浆施工过程中
	千斤顶不均匀顶推力	顶推施工过程中
抗浮力	重力分析模式	普遍适用
	考虑土体摩擦的改进土柱模式	隧道埋深增加或所处地层土质较好时的长期使用阶段适用,施工阶段因土体易扰动不适用
	考虑土拱的普氏理论模式	松散、破碎围岩中、砂质地层,此模式下埋深一般大于 1 D,此时隧道抗浮一般满足要求。
	考虑隧道顶部两侧土体的比鲍尔曼模式	长期使用阶段
	施工扰动分析	施工扰动阶段
衬砌管片抗浮力	管片自重	管片施工完成后均适用
	隧道内设备自重(道床、轨道等)	隧道内设备安装完成后
	环缝摩阻力	允许管片发生一定的小错动变形
	螺栓剪切	管片错动变形较大,螺栓受剪时
侧壁与地层之间的摩阻力		摩阻力及抗浮安全系数的选用目前尚无统一规定,另外隧道弧形侧壁摩阻力计算较为复杂,建议不考虑

## 2 穿越钱塘江隧道抗浮计算

隧道的埋置深度及覆土厚度直接影响工程的安全,覆土太浅易导致开挖面上土压力不足使盾构上浮、地面隆起甚至掌子面坍塌,覆土太深又使隧道结构所受水土压力过大加大工程造价,同时也加大了线路的纵坡坡度,可能超出规范允许值。根据《地铁设计规范》(GB 50157-2013)6.3.1 第 1 条规定,“正线的最大坡度宜采用 30‰,困难地段最大坡度可采用 35‰。在山地城市的特殊地形地区,经技术经济比较,有充分依据时,最大坡度可采用 40‰”;规范 6.3.4 条规定“正线坡度大于 24‰,连续高差达 16 m 以上的长大陡坡地段,应根据线路平纵断面和气候条件,核查车辆的编组及其牵引和制动的动力性能,以及故障运行能力”<sup>[6]</sup>。对于越江隧道,施工要求高,而大纵坡又不利于施工控制,因此一般设计中越江隧道纵坡按 30‰控制,以不超过 28‰为宜。如何合理地确定隧道的埋深,既满足规范最大坡度要求,确保隧道施工及运营安全,又降低工程造价,是隧道设计施工过程中需要解决的问题。

隧道埋深首先需要满足的是其抗浮条件,包括施工阶段及使用阶段。钱塘江在洪、潮水流反复交替作用下冲刷剧烈,工程河段深泓频繁摆动,河床冲刷剧烈,易冲易淤,河势变化复杂。所以河床的最大冲刷深度对隧道的抗浮分析尤为重要,需根据具体工程和水文地质条件按照 300 年一遇设计流量对隧址所在断面进行冲刷分析,从而对河床冲刷后隧道覆盖层是否满足抗浮要求进行验算。

下面以杭州地铁 4 号线穿越钱塘江盾构区间为例(其越钱塘江位置如图 6 所示),分析讨论隧道顶距离冲刷线最小距离为 3 m 时的抗浮是否满足要求。

隧道所在河段为钱塘江大桥至钱塘江二桥之间,上承珊瑚沙弯道、下接七堡弯道,年内冲淤特点表现为“洪冲潮淤”,年际间表现为“大冲大淤和少冲少淤”,现状钱塘江底标高为-2.6 m。建设单位委托两家单位对地铁4号线穿越钱塘江处的冲刷情况进行专题研究,运用实测资料的频率统计及回归分析计算、临界理论、沉积学方法、动床数学模型、水槽断面模型试验、动床整体模型试验对隧道断面最低冲刷高程分别进行了研究<sup>[16]</sup>。综合考虑上下游类似工程,建议隧道断面处300年一遇河床最低冲刷高程为-18.0 m,设计高水位为9.01 m,详见图7冲刷线以⑥1淤泥质粉质粘土层为顶板。



图6 隧道越钱塘江位置

Fig.6 Position for shield tunnel crossing Qiantang River

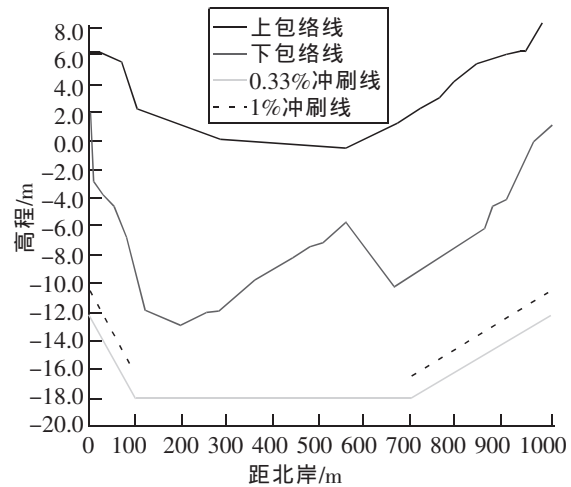


图7 隧道过钱塘江段断面冲刷包络线

Fig.7 The scour line of cross-section of cross-Qiantang River tunnel

2.1 长期使用阶段抗浮验算

盾构隧道埋设深度必须在最大冲刷工况下仍能满足抗浮要求。在长期使用阶段中,其不受施工阶段的注浆浆液影响,单位长度管片上浮力即为在水中所受的水浮力。考虑冲刷线的越江隧道上覆土厚度一般较薄,可不考虑土拱效应,隧道上浮土层为⑥1淤泥质粉质粘土层土性较差也可不考虑土体摩擦的影响,上覆土抗浮力可按重力分析模式或考虑隧道顶部两侧土体的比鲍尔曼模式。为保证越江隧道的安全度,要求管片不允许发生错动时不允许螺栓受剪切作用,衬砌管片的抗浮力考虑管片自重、隧道内部设备自重(仅考虑整体道床及轨道,未考虑隧道内其余附属物的重量和列车荷载),不考虑环缝摩阻力及螺栓剪切效应。

计算中使用的各参数如下:

管片外径  $R = 3.1$  m,内径  $r = 2.75$  m,管片上覆土的凝聚力  $c = 10$  kPa,内摩擦角  $\varphi = 10^\circ$ ,浮重度  $\gamma' = 7.3$  kN/m<sup>3</sup>,水重度  $\gamma_w = 10$  kN/m<sup>3</sup>,管片重度  $\gamma_c = 24.5$  kN/m<sup>3</sup>,单位长度整体道床及轨道自重  $W_s = 47.5$  kN/m,隧道上覆土  $h = 3$  m。

上覆土抗浮力按重力分析模式(考虑隧道拱腰以上覆土)及比鲍尔曼模式分别计算,各作用力如表3:

表3 长期使用阶段抗浮计算  
Tab.3 Long-term anti floating calculation

模式类型	各作用力/kN					安全系数 $k$	评价
	上覆土重	管片自重	道床及轨道重	抗浮力	水浮力		
重力分析模式	166	157.6	47.5	371.1	301.8	1.23	安全
比尔鲍曼模式	263.4			468.5		1.55	安全

由上表可知,在管片不发生错动,环缝及螺栓均未参与抗浮条件下,仅依靠重力作用,两种模式下隧道3 m覆土厚度均满足抗浮要求。若考虑隧道刚刚施工完成,道床及轨道暂未铺设,重力分析模式下安全系数为1.07,也可满足规范要求。但经过洪水冲刷后残留的上覆土是否受到很大程度的扰动,比尔鲍曼模式是否成立还需要进一步探讨,一般来说,从安全角度来说,不考虑此模式更容易为工程设计人员所接受。

## 2.2 施工阶段抗浮验算

冲刷线是在一定年限内(设计采用 300 年一遇)土层受河水冲刷剥离形成的最低标高的包络线,标志的是土层冲刷的极限状态。并不是表示某时全河底断面的冲刷形态。本工程现状江底距离冲刷线较大,约为 15.4 m,盾构江底的施工时间一般以月计,相较 300 年来说持续时间较短,可认为盾构施工时具有较厚的上覆土层,极限冲刷不发生,施工时完全满足抗浮要求。

从设计角度来说笔者认为本工程可不对施工阶段的抗浮做特殊计算,下面从学术角度提出一种极为特殊的情况做为探讨,即盾构施工时,钱塘江河床遭遇了 300 年一遇的洪水冲刷,且冲刷线与正在施工的盾构机的竖向净距正好为 3 m。

此时由于同步注浆液有可能未达到初凝使盾尾后方新施工的一定范围内管片处于流动浆液的包裹中,管片受浆液浮力作用。一般情况下,注浆液初凝时间为 10 h,但考虑到浆液在盾尾空隙中受到上覆土压力的作用易发生固结,浆液浮力将很快消失,可考虑为盾尾后方 2 环管片处于受浆液浮力状态,处于最不利情况<sup>[11]</sup>。

该 2 环管片受到的上浮力远大于水的上浮力;上覆土由于施工扰动且覆土较薄,其抗浮力采用重力分析模式,衬砌管片抗浮力仅考虑管片自重明显不满足要求,此时考虑已硬化浆液包裹管片环和盾尾拼装环对上浮管片环的前后 2 处环缝摩擦阻力及螺栓剪切抗浮将发挥作用,详见图 8。以这 2 环抗浮不利管片为受力对象进行抗浮分析,计算中使用的各参数如下:

浆液重度  $\gamma_s=19 \text{ kN/m}^3$ ; 计算环缝面摩阻力时参数  $N=16, \mu=0.6, N_i=2 \text{ kN}, N_j=0 \text{ kN}$ , 计 2 处环缝摩擦阻力; 计算螺栓剪切抗浮时参数  $n=2, 3, 4$ , 认为有 2, 3 或 4 根纵向螺栓受力最大, 最先被剪坏, 其应力传递给其他的螺栓, 从而引起其他螺栓剪坏的连锁反应, 螺栓型号为 5.8 级 M30,  $A_b=561 \text{ mm}^2, [\tau]=250 \text{ MPa}$ , 计 2 处环缝处的螺栓抗剪作用。

管片抗浮力按不错动下仅管片自重抗浮、小错动下环缝摩擦参与抗浮、大错动下螺栓剪切参与抗浮三种工况分别计算, 得到各作用力如表 4。

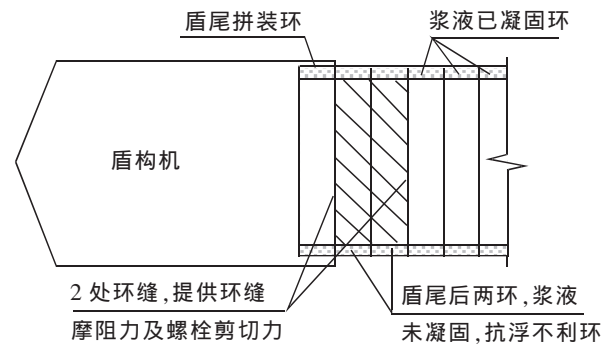


图 8 管片抗浮分析示意图  
Fig.8 Schematic diagram of segment anti floating

表 4 施工阶段抗浮计算  
Tab.4 Anti-floating calculation during construction

参数	各作用力/kN					安全系数 $k$	评价	
	上覆土重	管片自重	环缝摩擦抗浮	螺栓剪切抗浮	总抗浮力			
不错动			/	/	776.6	0.56	不安全	
小错动			38.4	/	815.0	0.59	不安全	
大错动 $n=2$	398.4	378.2	/	561.0	1 337.6	1 375.9	0.97	不安全
大错动 $n=3$			/	841.5	1 618.1		1.18	安全
大错动 $n=4$			/	1 122	1 898.6		1.38	安全

由表 4 可知, 施工阶段覆土为 3 m 时, 环缝摩擦抗浮未考虑顶推力残余压力仅依靠螺栓摩擦力能提供的抗浮力非常有限, 几乎可以忽略, 螺栓剪切能大大提供抗浮力, 仅 3 根螺栓参与剪切作用就可满足抗浮要求。



隧道注浆施工时还需考虑注浆压力引起的动态上浮力的影响,根据图2,最不利的工况为扇形环分布注浆。假定注浆压力 $P=0.4\text{ MPa}$ , $\theta=45^\circ$ ,计算得到上浮力为 $1\ 256\text{ kN/m}$ ,考虑仅一环管片注浆时需5根螺栓发挥剪切作用才能满足抗浮要求。所以施工中若覆土较薄应避免采用底部扇形注浆,尽量采取整体均匀分布法,且施工时采用跳环施工,保证注浆环管片可以得到两侧非注浆环管片的抗浮约束力。同时要求推进过程中顶推力均匀,不发生向上的偏心荷载。

以上抗浮仅为理论计算,施工阶段隧道上浮不仅与浮力大小、管片自重以及上覆土自重有关,也与注浆浆液初凝时间、二次注浆工序、管片螺栓接头性能有关,比如螺栓接头间的摩擦力及预紧力、螺栓的直径及分布等,还与土层软硬程度、盾构机机型(如重量、开口率等)、施工技术水平等相关。隧道抗浮的处理控制措施既可以从改善上覆土性能,增加上覆土厚度入手;也可以加强壁后注浆管理,严格控制浆液初凝时间,安排合理的注浆顺序,减小施工阶段地层扰动;还可以从改善管片接头性能入手,诸如加强螺栓等级,加大螺栓预紧力等,还需选择合适的盾构机型,加强施工技术水平。另外,对于极端的情况,可以考虑停止施工,隧道内增设配重等方式解决抗浮问题。

### 3 结论

1) 隧道所受到的上浮力及抗浮力比较复杂,不同作用工况、地层、上覆土厚度下其受力模式均不尽相同,抗浮计算时需根据其具体情况选择合适的受力模式。

2) 对于越钱塘江隧道抗浮,若现状江底浅而冲刷线深,可选择合理的施工时间,避开冲刷影响较大的月份,其抗浮工况主要受长期使用阶段控制。隧道抗浮计算可采用一般常用的重力抗浮模式,即 $F_{\text{抗}}$ 取隧道上覆土重及自重之和; $F_{\text{浮}}$ 取隧道在水中所受的浮力,至于比尔鲍曼模其中隧道顶两侧土重是否参与抗浮还需要进一步探讨,但比鲍尔曼模式计算偏不安全,建议本工程中采用一般的重力抗浮模式。

3) 若盾构隧道施工阶段遭遇300年一遇的洪水冲刷河床时,仅依靠上覆土重及管片自重无法满足抗浮要求时,可考虑环间纵向螺栓的剪切抗浮效应,螺栓剪切作用可提供较大的抗浮力。此外,浆液的初凝时间、二次注浆工序、施工扰动等也影响抗浮效果。

4) 隧道抗浮安全为隧道埋深选择需满足的最基本要求。实际工程中还需考虑地层土性、线路纵断面条件、水土压力、通航航段还需考虑下锚深度等,综合确定隧道埋深。杭州地铁4号线越钱塘江隧道最终设计采用的最小覆土埋深为 $3.5\text{ m}$ 。

### 参考文献:

- [1] 刘丹,谢锋. 工程类比法确定重庆朝天门两江隧道最小覆盖层厚度[J]. 公路交通技术, 2010, 8(4): 92-95.
- [2] 李连习,林志. 杭州地铁越江最小埋深和工程措施探讨[J]. 西部探矿工程, 2007(9): 161-163.
- [3] 沈林冲,钟小春,秦建设,等. 钱塘江盾构越江隧道最小覆土厚度的确定[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 111-115.
- [4] 陈裕康,高波,张粤. 南京地铁一号线盾构穿越内秦淮河掘进施工[J]. 探矿工程, 2003(6): 58-62.
- [5] 宋超业,周书明,谭志文. 水下盾构隧道合理覆盖层厚度的探讨[J]. 现代隧道技术, 2008(S): 47-51.
- [6] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50157-2013 地铁设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [7] 叶飞,朱合华,丁文其. 基于弹性地基梁的盾构隧道纵向上浮分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 65-69.
- [8] 叶飞,朱合华,丁文其,等. 大断面盾构隧道施工抗浮计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 10(5): 849-853.
- [9] 叶飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海:同济大学, 2007: 48.
- [10] 张庆贺,王慎堂,严长征,等. 盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 85-861.
- [11] 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.
- [12] 刘建行,候学渊. 盾构法隧道[M]. 北京:中国铁道出版社, 1991.
- [13] 朱正国. 连拱隧道围岩压力计算方法与动态施工力学行为研究[D]. 北京:北京交通大学, 2007.

- [14] 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.
- [15] DONDE P M,WANG J J. Shear Transfer Through Bolts in Segmental Tunnel Linings[C]//VIEITEZUTESA L,MONTANEZ-CAR-TAXO L E. Towards Towards New Worlds in Tunnelling. Rotterdam:BALKEMA A A,1992:295-301.
- [16] 曾剑,孙志林,曹颖,等. 杭州地铁 4 号线一期工程钱塘江隧道河段最大冲刷深度研究[R]. 浙江:浙江省水利河口研究院、浙江大学,2014:78.

## Anti-floating Analysis of Cross-river Shield Tunnel under Scour Line in Hangzhou

Yang Jiu

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** It is a common occurrence that the flood scours the riverbed and the back-silting takes place immediately by turn, which inevitably influences the safety of shield tunnel through the Qiantang River. The buried depth of shield tunnel must content Anti floating requirement. How to determine the thickness of covering layers reasonably is an urgent problem to be solved to ensure the safety of tunnel and the construction cost under control. This paper considers anti floating force of tunnel and its application under various working conditions, and taking the Hangzhou Metro Line 4 crossing the Qiantang River Tunnel as an example. The results shows, the anti floating force of tunnel is controlled by scour line under use phase. the anti floating force of tunnel can choice the gravity anti floating mode, which is safety when the overburden of tunnel is three metres. Special circumstances are also discussed when the tunnel under construction is encountered scour by the river floods in 300 years. In this moment, we need to consider a lot of things, including the shear force of Tunnel bolt, the primary coagulation time and the grouting process.

**Key words:** cross-river tunnel; scour line; anti floating

(责任编辑 王建华)