

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.034

考虑浆液黏滞特性的大直径盾构隧道管片上浮机理分析

林蔚劲¹, 张孟喜^{1*}, 肖晓春², 吴惠明², 加武荣³

(1.上海大学 土木工程系, 上海市 200444; 2.上海隧道工程有限公司; 3.中铁二十局集团有限公司)

摘要:通过对大直径盾构隧道管片进行受力分析,研究了盾构隧道管片的上浮机理,认为浆液产生的浮力是管片上浮的主要原因。考虑到浆液的凝固特性,浆液浮力将随注入的时间而减小,管片上浮运动状态将产生变化。基于此,认为管片脱离盾尾后的上浮量主要包括3部分:①管片在浆液中上浮运动产生的上浮量;②管片上覆土压缩引起的上浮量;③管片自身的受力变形。之后,考虑了浆液的黏滞特性,通过运动学及弹性力学的方法推导了管片上浮量的计算公式,并对上海某新建大直径公路隧道施工阶段管片的上浮量进行了计算对比。最后,结合管片上浮参数分析提出了管片上浮的控制措施。

关键词:大直径盾构隧道;管片上浮;机理分析;上浮量计算

1 引言

随着中国经济的发展,越来越多的交通工程需要进行隧道建设。而在城市中进行的隧道工程大多采用盾构法施工。其中,公路隧道又以大直径盾构隧道为主。在大直径盾构隧道的施工过程中,大量监测数据表明:衬砌管片脱离盾尾之后,容易发生上浮现象。管片的受力上浮会导致隧道轴线的偏移、管片产生错台与破损、环间螺栓剪断以及渗漏水等安全事故,也会造成地面隆起现象,引起地面建筑的损坏,影响隧道的施工及安全运营,所以需要研究隧道管片的上浮问题。

叶飞等对管片的受力特性进行了分析并认为隧道的壁后注浆压力是隧道产生上浮的主要原因,同时对不同注浆压力的分布方式对浆液产生的动态上浮力进行了计算;魏纲等对管片的力学特性进行了分析,对比了管片在正常设计情况与受到浮力作用下的受力情况;王其炎、肖明清通过数值模拟分析了注浆压力、覆土厚度与注浆材料性质等因素对管片上浮的影响;朱令等认为隧道浆液所产生的浮力是变化的,并建立了盾构隧道纵向模型,通过有限元软件研究了壁后注浆引起隧道上浮对结构的影响;戴志仁认为管片受到的上浮力分为动态上浮力与静态上浮力两种,分别由地

层条件和隧道埋深变化以及液态浆液包裹而产生,并推导了这两种上浮力的计算公式;Talmon以上海长江隧道工程为例,得出在施工阶段考虑上浮状态时隧道管片纵向受力的计算结果;梁禹等通过弹性力学的方法计算了上浮力对地层产生的压缩上浮量,并分析了地质条件、浆液模量等计算参数对管片上浮量的影响。

上述文献大多从隧道上浮原因与管片上浮对隧道结构的影响上进行了研究,探讨了不同上浮力的产生原因与地层条件等因素对上浮力的影响。但对上浮力研究时很少考虑浆液性质对上浮力的影响,如浆液凝固会导致浆液浮力的减小等情况,并且对管片上浮量的预测理论还研究较少。该文通过对管片脱离盾尾后的受力进行分析,考虑浆液的凝固特性与黏滞特性,研究管片的上浮机理,并对隧道管片脱离盾尾之后产生的上浮量进行分析与计算。

2 管片上浮机理分析

2.1 管片上浮原因分析

在盾构隧道施工过程中,衬砌管片脱离盾尾之后,管片外圈与土层之间存在空隙,需要对此空隙进行注浆填充,这个过程被称为同步注浆。而管片的上浮也多发生在这个阶段,如图1所示。导致管片上浮的原

收稿日期:2018-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41172238);上海隧道工程有限公司“北横通道”项目科研课题

作者简介:林蔚劲,男,硕士研究生.E-mail:lynweijin@126.com

*通信作者:张孟喜,男,教授,博士生导师.E-mail:mxzhang@i.shu.edu.cn

因很多,如浆液产生的浮力、注浆压力及施工扰动等,该文主要考虑浆液浮力对管片上浮的影响。

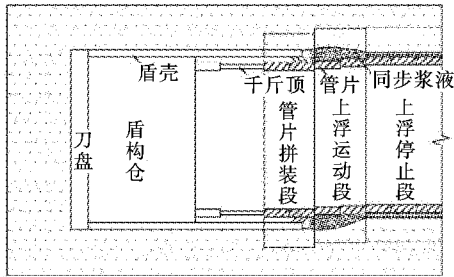


图1 管片上浮示意图

刚注入的浆液尚未凝固呈液体状态时,将管片包裹在内,此时浆液会对管片产生浮力。当管片脱离盾尾时,取一环管片进行受力分析,如图2所示。

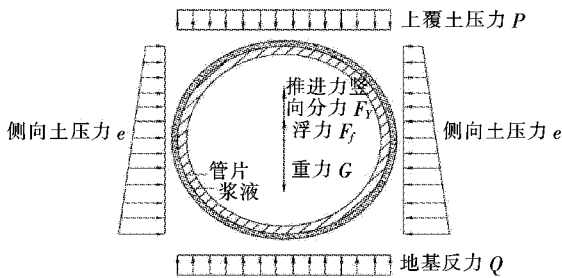


图2 管片脱离盾尾时受力状态

此时管片在竖直方向上受到以下作用力:①浆液产生的浮力 F_f ;②上覆土压力 P ;③盾构机推进力对管片产生的竖向分力 F_y ;④管片自身的重力 G ;⑤地基反力 Q 。

其中,推进力对管片产生的竖向分力 F_y 与盾构机姿态有关,当盾构机姿态为向下开挖时,其推进力对管片产生的竖向分力作用沿竖直方向向上,如图3所示。同时,由于隧道开挖导致地基卸载,下部地基将产

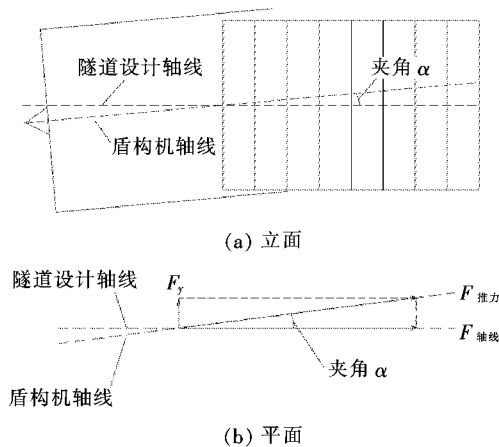


图3 盾构机开挖姿态及推进力竖向分力示意图

生回弹,对管片形成向上的作用力。但这里考虑到盾构推进会造地层损失,认为其影响与地基回弹对隧道的影相互抵消,所以不考虑由地基回弹对管片产生的作用力。

2.2 管片上浮运动状态分析

2.2.1 上浮运动状态

通过对管片进行受力分析可知,如果浆液所产生的浮力与推进力竖向分力所组成的上浮力 $F_{浮}$ 大于上覆土压力与管片重力所组成的抗浮力 $F_{抗}$,即管片的受力状态为 $F_f + F_y > P + G$ 时,管片在竖直方向上将受到向上的浮力,管片将产生上浮运动。此时,管片处于上浮运动状态,不承受下部的地基反力。反之,如果管片的受力状态为 $F_f + F_y < P + G$ 时,管片将不会产生上浮运动,此时管片将受到下部地基产生的地基反力 Q ,直接进入静止平衡状态。

2.2.2 上浮停止时刻

在管片发生上浮运动后,浆液在刚注入盾尾空隙时,近乎为液体状态,考虑到浆液的凝固特性,其所产生的浮力 F_f 应随浆液注入后时间的增长而减小,即上浮力减小,而抗浮力并没有变化。所以随着时间的增长,上浮力 $F_{浮}$ 将逐渐减小到与抗浮力 $F_{抗}$ 相等,这时,管片的受力状态为 $F_f + F_y = P + G$,管片的上浮运动停止。此时刻为上浮停止时刻。

2.2.3 静止平衡状态

随后,随着浆液继续凝固,浆液产生的浮力进一步减小,管片受到的上浮力 F_f 将小于抗浮力 $F_{抗}$ 。此时管片有向下运动的趋势,开始承受下部地基反力,即管片的受力状态变为 $F_f + Q + F_y = P + G$,此时,管片达到静止平衡状态。

所以当管片脱离盾尾之后,如果发生上浮,则主要原因为浆液所产生的浮力与推进力竖向分力组成的上浮力 $F_{浮}$ 大于上覆土压力与管片重力所组成的抗浮力 $F_{抗}$,并且上浮运动将随着浆液的逐渐凝固和上浮力的减小而停止。

3 管片上浮量分析与计算

3.1 管片上浮量分析

由2.2节管片上浮运动状态分析可以得出,如果管片在脱离盾尾之后,发生上浮运动,其上浮量在管片进入上浮运动时产生,在管片上浮停止时结束。而管片在脱离盾尾之后整个上浮过程中产生的上浮量 S 主要由3部分组成:①管片从上浮运动状态到上浮停

止并最终进入静止平衡状态。在此过程中,管片在浆液中的上浮量为 S_1 ,如图 4 所示;② 在管片脱离盾尾之后,管片受到的上浮力大于抗浮力,就会对管片上覆土产生一个向上的作用力。此时,无论管片上覆土的重力是否大于该作用力,这个向上的作用力都会对上覆土产生压缩作用,使上覆土产生压缩变形,造成管片的上浮,即管片上覆土压缩引起的上浮量 S_2 ,如图 5 所示;③ 管片受到周围土的压力而自身发生的变形 S_3 ,由于受到管片环顶点的上浮量影响,这种变形可能呈现两种情况,如图 6 所示。由此可得管片脱离盾尾后的上浮量 $S = S_1 + S_2 + S_3$ 。

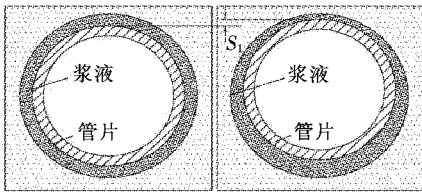


图 4 管片在浆液中的上浮量 S_1

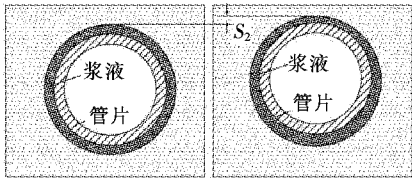


图 5 上覆土压缩引起的管片上浮量 S_2

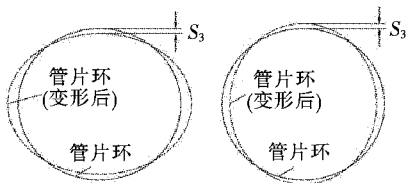


图 6 管片自身的受力变形 S_3

3.2 管片在浆液中的上浮量 S_1 计算

当管片在浆液中发生上浮运动时,由于浆液具有黏滞特性,管片在浆液中运动时将受到浆液产生的黏滞阻力 F_n 。根据管片的受力分析及运动学理论得:

$$F_f + F_y - G - P - F_n = Ma \quad (1)$$

式中: M 为一环衬砌管片的质量; a 为管片上浮运动的加速度。

当浆液刚注入注浆层时,还近似于液体状态,初始浮力 F_{f0} 可按阿基米德定律计算。而随着浆液的凝固,浆液产生的浮力 F_f 将随着浆液注入注浆层的时间增加而减小。所以这里假设:

$$F_f = F_{f0} + kt \quad (2)$$

$$F_{f0} = \rho_s g V \quad (3)$$

式中: F_f 为浆液浮力; F_{f0} 为浆液刚注入时的初始浮力; ρ_s 为浆液重度; V 为一环管片体积; k 为浮力随时间变化的系数,其大小可以根据管片从上浮到静止平衡的受力分析得出,即:

$$k = (P + G - F_y - F_{f0}) / t_1 \quad (4)$$

式中: t_1 为管片从上浮开始到上浮停止所用时间。

对于管片在浆液中受到的黏滞阻力 F_n ,其大小与管片的运动速度有关,即:

$$F_n = K_1 v \quad (5)$$

式中: K_1 为浆液黏滞系数,与浆液的性质有关; v 为管片的上浮速度。

将式(2)、(3)、(5)代入式(1)得:

$$F_{f0} + kt + F_y - G - P - K_1 v = Ma \quad (6)$$

为简化计算,可令:

$$F_p = F_{f0} + F_y - G - P \quad (7)$$

式中: F_p 为剩余上浮力,即当浆液刚注入时,管片受到的上浮力与抗浮力之差。

将式(7)代入式(6),并将管片上浮速度与加速度表示为上浮量的导数,可得:

$$kt + F_p - K_1 \frac{dS_1}{dt} = M \frac{d^2 S_1}{dt^2} \quad (8)$$

又因为当管片刚脱离盾尾时,管片的上浮量与速度均为零,即当 $t = 0$ 时, $S_1 = 0$, $v = 0$,所以可求解式(8)得:

$$S_1 = \frac{M}{K_1} \cdot \frac{K_1 F_p - kM}{K_1^2} e^{-\frac{K_1}{M}t} - \frac{M}{K_1} \cdot \frac{K_1 F_p - kM}{K_1^2} + \frac{k}{2K_1} t^2 + \frac{K_1 F_p - kM}{K_1^2} t \quad (9)$$

式(9)即为管片在浆液中上浮量 S_1 的计算式。

3.3 管片上覆土压缩引起的上浮量 S_2 计算

由 3.1 节管片上浮量分析可得,当管片受到的上浮力大于抗浮力时,将对上覆土产生一个作用力,这个力即为前文所提的剩余上浮力 F_p 。若将隧道管片视为刚性地基基础,则上覆土压缩引起的上浮量可参照地基基础沉降公式计算,运用弹性力学方法,可以计算其上覆土压缩上浮量 S_2 :

$$S_2 = \frac{1-\mu}{E_0} \omega B P_0 \quad (10)$$

$$P_0 = \frac{F_p}{A} \quad (11)$$

式中: μ 为上覆土的泊松比; E_0 为上覆土的变形模量; ω 为沉降影响系数,可查相关表格获得; B 为计算管片

的有效宽度,可取 $\sqrt{2}R_0$; R_0 为隧道外半径; A 为剩余上浮力 F_p 的作用面积。

式(10)即为管片上覆土压缩引起的上浮量 S_2 的计算公式。

3.4 管片自身的受力变形 S_3 计算

对于管片的受力变形 S_3 ,可采用地下结构的理论计算方法或数值分析方法计算,如地层结构法或荷载结构法等。由于考虑管片自身变形 S_3 与管片在浆液中的上浮量 S_1 与管片上覆土压缩引起的上浮量 S_2 相比较小,所以这里不再详细分析。

4 工程实例计算对比

上海某新建大直径盾构公路隧道,其衬砌管片外

径为 15 m,一环管片宽度为 2 m,管片为 C50 混凝土,混凝土重度为 25 kN/m^3 ,管片厚度为 65 cm。在盾构始发出洞之后不久产生管片上浮情况,此时盾构机姿态为下探开挖,设计纵坡为 4.5%。这里推进力取刀盘所承受的侧向土压力,其竖向分力 F_y 方向向上。该文选取第 80~100 环进行上浮量计算,之后与现场监测数据进行对比分析。以隧道第 80 环管片计算为例,其隧道上覆土主要由黄~灰色砂质粉土构成,土的物理性质指标如表 1 所示,上浮量 S_1 与上浮量 S_2 计算结果如表 2、3 所示。

计算得到第 80 环管片的上浮量 S 为 45.97 mm,其现场监测值为 48 mm。80~100 环的管片上浮量计算值与现场监测值对比如图 7 所示。

由图7可以看出:公式计算所得管片上浮量随着

表 1 上覆土物理性质

泊松比 μ	孔隙比 e	比重 G_s	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	浮重度 $\gamma'/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	变形模量 E_0/MPa
0.3	0.871	2.70	18.5	9.08	8.9	26.7

表 2 上浮量 S_1 计算结果

隧道中心埋深/m	管片重力 G/kN	上覆土压力 P/kN	初始浮力 F_{f0}/kN	推进力竖向分力 F_y/kN	剩余上浮力 F_p/kN	上浮时间 t_1/h	浮力系数 $k/(\text{kN} \cdot \text{h}^{-1})$	黏滞系数 $K_1/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	上浮量 S_1/mm
25	1 465.2	4 735.5	7 068.6	1 838.9	2 706.9	60	-45.1	23.5	34.46

表 3 上浮量 S_2 计算结果

剩余上浮力 F_p/kN	有效宽度 B/m	作用面积 A/m^2	沉降影响系数 ω	等效压力 P_0/kN	上浮量 S_2/mm
2 706.9	10.6	21.2	1.72	127.6	11.51

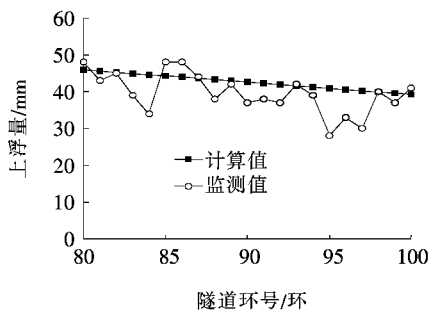


图 7 管片上浮量 S 计算值与监测值对比

环数的增大而减小,即随隧道埋深的增加而减小。但现场监测数值反映出管片的上浮量并不完全符合规律,其上浮量与每一环管片所在土层的具体情况有关。如上覆土的平均重度可能发生改变。但其数值与计算值相差不大,所以上文推导的公式可以对施工时同步

注浆段的管片上浮量进行一定程度的预测,以便施工时提前进行上浮控制工作。

5 管片上浮参数分析及施工控制措施

当管片出现上浮问题时,需要采取一定的措施对隧道上浮进行控制,否则隧道容易出现管片错台、破损及地面隆起等不良现象,对隧道本身及地表建筑物都造成不利影响,具体采用何种控制措施,需要对影响管片上浮的参数进行分析。

由管片上浮量的计算公式可知,其上浮量与剩余上浮力 F_p 、上浮时间 t 及管片质量等因素有关。而剩余上浮力大小与浆液浮力大小、推进力竖向分力大小及管片重力有关。这些力的大小又是根据浆液重度、

隧道纵坡坡度及管片质量计算得到。所以这里使用前文的隧道参数,选取几个关键参数分析其对管片上浮量的影响。如图 8 为管片上浮参数分析图,其分别为不同上覆土浮重度、不同上浮时间 t 、不同纵坡坡度及

不同浆液黏滞系数下的管片上浮量。从图 8 可以看出:随着隧道中心埋深、上覆土浮重度增大及浆液黏滞系数的增大,管片上浮量减小。随着管片上浮时间及隧道纵坡坡度的减小,管片上浮量减小。

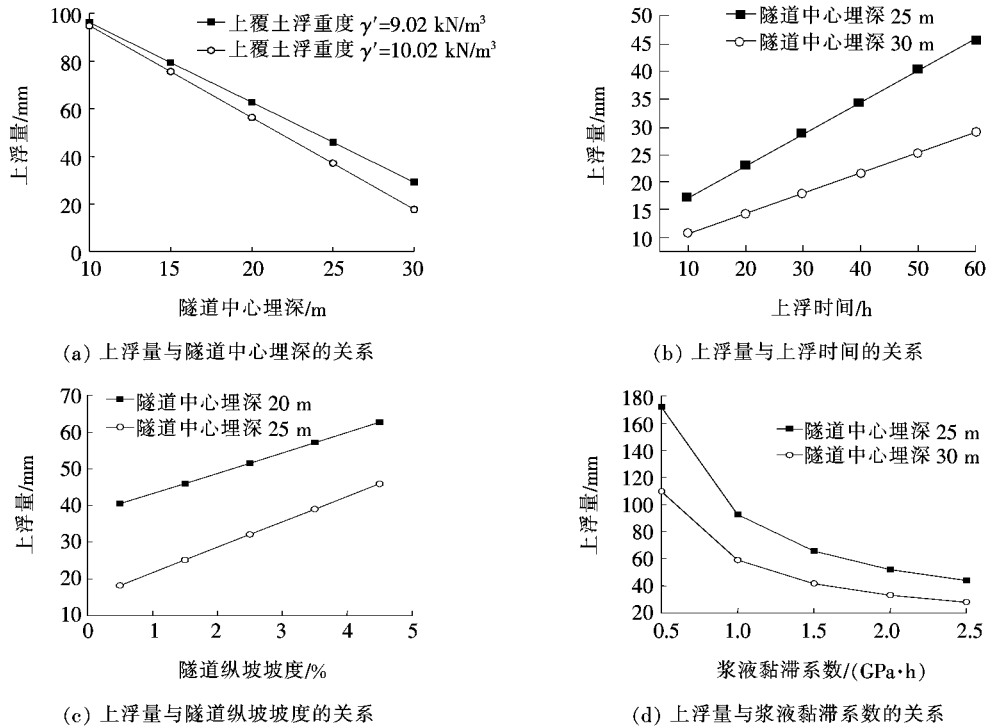


图 8 管片上浮参数分析

根据上浮参数分析可以得到,若想减小管片的上浮量,可从调整管片质量、控制上浮力大小与浆液性质等方面采取以下措施:

(1) 在盾构施工时,可适当调整盾构机姿态,控制掘进速度,减小推进力或盾构机的下探开挖纵坡坡度,以降低推进力竖向分力造成的上浮力。

(2) 在浆液方面,可以适当调整浆液配比,如使其浆液重度减小或使浆液更快凝固,从而减小管片的上浮力与上浮时间,有效地控制管片上浮。

(3) 在盾构施工时,可在盾构机推进后的管片上添加重物进行压重处理,以增加管片的重量,减小管片上浮量。

(4) 在隧道设计时尽量增大隧道埋深,使管片上覆土厚度增加,可以很大程度上减少隧道管片上浮现象的出现。

6 结论

(1) 盾构隧道管片在同步注浆阶段产生上浮的原

因主要为浆液产生的浮力与盾构机推进力的竖向分力组成的上浮力大于上覆土压力与管片自重组成的抗浮力。并且由于浆液的凝固特性,浆液的浮力会随注入时间增加而减小,管片上浮运动状态也随之改变,由上浮运动状态进入静止平衡状态。

(2) 盾构隧道管片在同步注浆阶段脱离盾尾之后产生的上浮量主要由 3 部分组成:管片在浆液中上浮运动产生的上浮量 S_1 、管片上覆土压缩引起的上浮量 S_2 及管片受到周围土压力而自身发生的变形 S_3 。

(3) 考虑浆液的黏滞特性,对管片脱离盾尾之后所产生的上浮量计算公式进行了推导,并与工程实例实测结果进行了对比。认为公式计算结果对施工时的管片上浮量有一定的预测作用。

(4) 对影响管片上浮的参数进行了分析,并根据分析结果提出了一些施工控制措施,如增加管片质量、降低盾构机推进坡度及减小浆液重度等。

参考文献:

[1] 沈征难.盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.035

不同地下水位下地铁车站施工沉降对比分析

戴文亭, 王琦*, 罗传英, 王振, 王宇放, 孙思博

(吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了对比分析不同地下水位下地铁车站在施工过程中的沉降变化情况,以长春地铁2号线解放大路车站为实际依托工程,建立了该地铁车站的有限元模型,并且将有限元计算结果与现场实测的施工沉降数据进行对比分析,验证了有限元模型的可靠性。分析了地铁车站中轴线上方的地表沉降在施工过程中的变化情况,并对上导洞、中导洞及1、2洞室拱顶沉降在施工过程中的变化情况进行了分析。通过定义3种不同地下水位工况,将不同地下水位下地铁车站的施工沉降曲线进行对比分析。结果表明:地铁车站中轴线上方地表沉降的有限元计算结果和实测数据的最大误差仅为5.6%,地铁车站中轴线上方的地表沉降量呈现出阶梯式的变化趋势,随着地下水位高度的下降,拱顶沉降量的增长幅度存在突变情况。

关键词: 地铁车站; 地下水; 有限元分析; 施工沉降

近年来,中国城市轨道交通发展迅猛,但是在城市地铁建设过程中,存在着很多与地下水有关的工程技术难题。地铁在施工过程中,土层失水会产生固结沉降,而基坑开挖及卸载也会使土体产生沉降,并且地铁的周边具有较为集中的构筑物及城市交通线路,因此在施工过程中应该将施工沉降控制在合理的范围内,否则后果不堪设想。中国诸多学者对其进行了研究,毕焕军建立了胡麻岭的水文地质数学模型,根据此数

学模型研究了胡麻岭隧道水敏性砂岩地下水渗流效应;易小明等以厦门海底隧道陆域段为实际工程依托,研究了其在流固耦合作用下的力学响应情况;孙明志等以某地铁施工项目为实际工程依托,将数值模拟的计算结果与现场实际监测的数据进行对比验证,分析施工阶段的地表沉降等因素,提出了合理的导洞施工顺序;侯伟等根据太沙基一维固结理论,推导出能够综合评价各类复杂水位环境下地表沉降的计算公式,并

[J].现代隧道技术,2004(6).

[2] 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(5).

[3] 赵永明,杜守继,张强.盾构隧道通缝拼装管片上浮的监测研究[J].地下空间与工程学报,2007(增1).

[4] 叶飞,何川,王士民.盾构隧道施工期衬砌管片受力特性及其影响分析[J].岩土力学,2011(6).

[5] 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(5).

[6] 魏纲,洪杰,魏新江.盾构隧道施工阶段管片上浮的力学分析[J].岩石力学与工程学报,2012(6).

[7] 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).

[8] 肖明清,孙文昊,韩向阳.盾构隧道管片上浮问题研究[J].岩土力学,2009(4).

[9] 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(增2).

[10] 戴志仁.盾构隧道盾尾管片上浮机理与控制[J].中国铁道科学,2013(1).

[11] TALMON A.M., BEZUIJEN A. Calculation of Longitudinal Bending Moment and Shear Force for Shanghai Yangtze River Tunnel: Application of Lessons from Dutch Research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35(3): 161-171.

[12] 梁禹,阳军生,林辉.大直径盾构隧道施工阶段管片上浮与受力研究[J].现代隧道技术,2016(3).

[13] 张鸣远,景思睿,李国君.高等工程流体力学[M].北京:高等教育出版社,2012.

收稿日期:2018-06-18

基金项目:吉林省科学技术厅项目(编号:3R1133142417)

作者简介:戴文亭,男,教授.E-mail:daiwt@jluedu.cn

*通信作者:王琦,男,硕士研究生.E-mail:757911899@qq.com