

## 盾构隧道管片抗浮验算及防治对策研究\*

陈峰<sup>1</sup>, 傅鹤林<sup>2</sup>, 史越<sup>2</sup>, 田辉<sup>1</sup>, 李金强<sup>1</sup>

(1. 中建市政工程有限公司, 北京 100071; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 以湖南衡阳市二环东路合江套湘江盾构隧道为工程背景, 基于典型断面和数值分析手段, 对掘进过程中管片上浮力的计算方法和整治措施进行了总结, 对该隧道管片抗浮进行了安全分析和受力验算, 并提出了相应抗浮措施。

**关键词:** 隧道; 盾构管片; 抗浮验算; 防治对策

中图分类号: U458.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)01-0174-04

近年来, 随着各类盾构隧道的大规模兴建, 管片上浮成为施工中迫切需要解决的一大难题。许多学者也对管片上浮机理及处置办法进行了研究, 形成了不少科研成果, 并在生产实践中得到了应用。

## 1 工程概况

衡阳市二环东路合江套湘江隧道为双向四车道城市快速路, 设计速度 60 km/h, 线路起于石鼓区来雁新城北二环路, 穿越后街路、滨江北路、湘江和规划中的湘江东路后, 止于珠晖区京广铁路上行线西北侧, 全长约 2.27 km。过湘江段采用双线盾构法施工, 南线和北线基本平行, 线间距 13.6 m, 其中北线长 923 m, 南线长 921.31 m, 坡度为 5% 左右, 最低覆土厚度 5~8 m。路线纵断面见图 1。

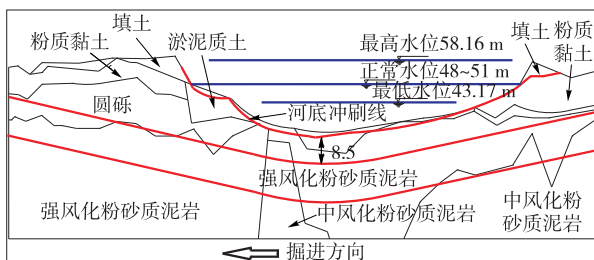


图 1 隧道北线纵断面(单位: m)

合江套隧道外径为 11.30 m, 内径为 10.30 m, 管片厚度 50 cm, 环宽 2 m, 环向由 1 块封顶块、2 块邻接块、3 块标准块采用通用楔形环方式错缝拼装组成, 楔形量 40 mm, 直螺纹连接。块与块之间设置 2 颗 M36 环向螺栓, 螺栓机械等级为 5.8~8.8 级; 环与环之间每环布置 36 颗 M30 纵向螺栓, 螺栓

机械等级为 8.8 级。管片砼采用 C50P12, 钢筋采用 HRB400 级钢, 预埋件采用 Q235B 级钢。盾构管片各环之间设置剪力销, 各管片接缝外侧设置 2 道弹性密封垫止水, 内侧预留嵌缝槽。

盾构隧道主要穿越湘江大堤及湘江河床, 地层变化较大。主要地层情况如下: 1) 湘江西岸段地层由上至下分别为填筑土、粉质黏土、粉土、圆砾、中砂及强风化粉砂质泥岩, 这段隧道洞身主要处于圆砾、中砂及强风化粉砂质泥岩中, 洞顶处于圆砾和中砂层中。2) 过江盾构段地层由上至下分别为淤泥层、圆砾、强风化粉砂质泥岩及中风化粉砂质泥岩, 这段隧道洞身主要处于强风化粉砂质泥岩中, 部分地段隧道底部进入中风化粉砂质泥岩中。3) 湘江东岸段地层由上至下分别为填筑土、粉质黏土、圆砾、中砂及强风化粉砂质泥岩, 这段洞身主要处于粉质黏土、圆砾、强风化粉砂质泥岩中。

## 2 抗浮计算

### 2.1 管片刚度计算

隧道管片刚度是影响隧道管片上浮的重要因素, 国内外学者对此进行研究, 引入纵向等效刚度等概念。常见模型有:

(1) 梁—弹簧模型。小泉淳等以梁模拟管片, 以弹簧模拟隧道与土层之间的作用, 得出了隧道管片纵向等效抗弯刚度表达式[见式(1)]。该等效方法满足了纵向弹性地基平衡方程, 与试验结果也较吻合。

$$(EI)_{eq} = \frac{K_{r0}}{K_{r0} + E_s I_s / l} E_s I_s \quad (1)$$

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51578550; 51538009); 中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2016-Z-24)

式中:  $K_{\theta}$  为管片的环缝转动刚度,一般需通过试验确定;  $E_s$  为隧道管片的弹性模量;  $I_s$  为隧道纵向惯性矩;  $l$  为管片环宽。

(2) 纵向等效连续化模型。志波由纪夫等将盾构管片和接头等效为刚度相同、结构弹性相近的连续梁(见图 2), 得出了隧道等效抗弯刚度表达式[见式(2)、式(3)]。廖少明等经研究认为纵向等效连续化模型将管片和接缝等效为一体, 夸大了接缝的影响, 对比上海地铁隧道试验结果误差较大, 并对各种地基模型下隧道纵向剪切传递效应进行研究, 提出了改进的纵向等效连续化模型。

$$(EI)_{eq} = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos \varphi + (\pi/2 + \varphi) \cdot \sin \varphi} E_s I_s \quad (2)$$

$$\varphi + \cot \varphi = \pi \left( \frac{1}{2} + \frac{nK_b}{E_s A_s / l} \right) \quad (3)$$

式中:  $E_s$  为隧道管片的弹性模量;  $I_s$  为隧道纵向惯性矩;  $n$  为纵向螺栓数量;  $K_b$  为接头处螺栓的线刚度,  $K_b = E_b A_b / l_b$ ;  $E_b$  为接头处螺栓的弹性模量;  $A_b$  为螺栓的横截面面积;  $l_b$  为接头处螺栓的长度;  $A_s$  为隧道横截面面积;  $l$  为管片环宽。

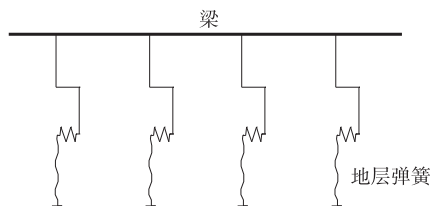


图 2 等效连续化模型示意图

(3) 广义纵向等效连续化模型。徐凌等提出了广义纵向等效连续化模型, 其中纵向等效抗弯刚度表达式见式(4)、式(5), 并证明了志波由纪夫提出的纵向等效连续化模型为该模型的特例。

$$(EI)_{eq} = EI \cdot \frac{K_b \cdot l}{K_b (l - \lambda l_b) + \lambda l_b} \quad (4)$$

$$(EA)_{eq}^I = \begin{cases} \frac{l}{l + \lambda \cdot E_c A_c / K_{j1}} \cdot E_c A_c & \lambda \leq 1 \\ \frac{l}{l + E_c A_c / K_{j1}} \cdot E_c A_c & \lambda \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $E$  为管片的弹性模量;  $I$  为隧道横截面惯性矩;  $K_b$  为环缝影响范围内弹性弯曲刚度的等效系数;  $l$  为每环管片宽度;  $\lambda$  为纵向螺栓的影响系数;  $l_b$  为螺栓长度;  $E_c$  为每环管片截面模量;  $A_c$  为每环管片截面面积;  $K_{j1}$  为各纵向螺栓的弹性刚度系数。

(4) 三维骨架模型。以上模型将隧道受力看成

平面问题, 只有在特定条件下才能成立, 局限性较大。为此, 小泉淳等提出了三维骨架模型, 该模型对管片、环缝都进行了具体详细的建模, 能准确形象地反映隧道的受力和变形, 但建模时单元数目较大且环缝的取值有待进一步研究。

对上述常见模型进行对比分析, 梁—弹簧模型更适用于考虑管片环向性能的情况; 三维骨架模型虽然形象具体, 但因单元数目过多, 参数不明确, 计算容易出现不收敛等问题, 实用性不强; 纵向等效连续化模型将隧道纵向等效为刚度和特性相当的连续梁, 计算较合理。叶飞等在考虑横向刚度影响的基础上将纵向刚度等效公式进行进一步推导, 得出了隧道纵向等效抗弯刚度表达式:

$$(EI)_{eq} = E_c \lambda_1 + \frac{n l K_b \lambda_2}{A_s} \quad (6)$$

式中:  $E_c$  为管片的弹性模量;  $n$  为纵向螺栓数量;  $l$  为盾构管片环宽;  $K_b$  为接头处螺栓的线刚度;  $A_s$  为隧道横断面截面面积。

## 2.2 上浮力计算

采用纵向等效连续化模型将管片等效为连续梁, 地基反力通过曲面弹簧施加在管片上代替覆土荷载, 取埋深为 7.5 m 进行上浮力计算。

(1) 纵向等效刚度。根据式(6)对该工程中管片纵向等效抗弯刚度进行计算, 材料和设计参数见表 1。得该隧道管片的纵向等效刚度为  $5.2 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。

表 1 计算所用管片材料和设计参数

项目	参数值	项目	参数值
$a/\text{m}$	5.65	$l/\text{m}$	2
$b/\text{m}$	5.65	$E_b/\text{MPa}$	$2 \times 10^5$
$n/\text{根}$	36	$E_c/\text{MPa}$	$3.45 \times 10^4$
$r_b/\text{m}$	0.015	$l_b/\text{m}$	0.08

(2) 地基反力系数。地基反力系数是引起单位面积地表下沉所需施加的力。地基反力系数的确定是一个复杂问题, 这里根据经验取值法将隧道地基反力系数取为  $7\,500 \text{ kN/m}^3$ 。

(3) 上浮力。隧道上浮分为静态上浮和动态上浮, 动态上浮主要由不当的注浆引起。该工程盾尾采用同步注浆, 动态上浮力并不是引起上浮的主要原因, 按经验取 1.1 倍静态上浮力作为总上浮力。

$$F_{\text{浮}} = \eta \pi R_0^2 \gamma - \pi (R_0^2 - R_1^2) \gamma_1 = (2\,161 - 424) = 1\,737 \text{ kN/m} \quad (7)$$

(4) 上浮力计算。采用连续地基梁模型,上覆土采用曲面弹簧等效受压作用,计算长度 100 m,左端约束采用铰接,右端上浮力采用三角形分布荷载以考虑浆液凝固时浮力的时效性,综合掘进速度和浆液初凝时间,荷载分布长度约为 10 m。因右侧管片受盾构盾尾约束影响,将端头两环管片(4 m)的地基反力系数增大 4 倍,即 30 000 kN/m<sup>3</sup>。上浮模型见图 3。模型考虑上覆土重力和浮力的共同作用,得出管片最大位移在尾部(见图 4),最大竖向位移为 27.2 mm。在开挖过程中,管片实测最大上浮值约为 35.6 mm,计算结果比实际偏小。考虑到引起管片上浮的因素有多种,该模型可靠,可用来预测隧道穿江过程中的管片上浮情况。

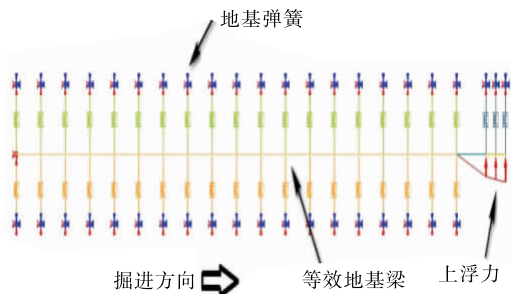


图3 上浮力计算模型

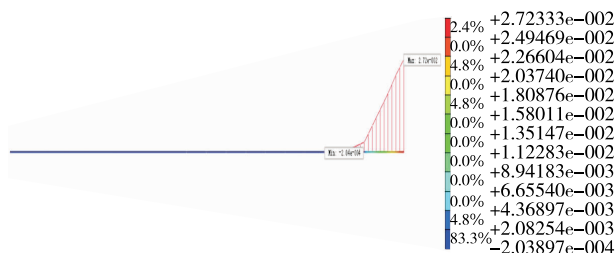


图4 管片竖向位移云图(单位:m)

### 3 管片上浮的防治对策

#### 3.1 及时监测盾构姿态

盾构在推进过程中受到千斤顶的推力作用,若千斤顶推力大小或角度出现偏差,管片受力不均,将造成盾构姿态偏差,使管片错台。在软弱土层中,因盾构刀盘较重,很容易产生“栽头”现象,一旦产生“栽头”现象,就很有可能造成管片上浮。管片在掘进中的受力情况见图 5。当  $P_1 < P_2$  时,下部管片产生挤土效应,造成管片上浮;当  $P_1 > P_2$  时,上部管片挤土效应造成管片下沉;只有当  $P_1 = P_2$  时,管片才能基本保持稳定。

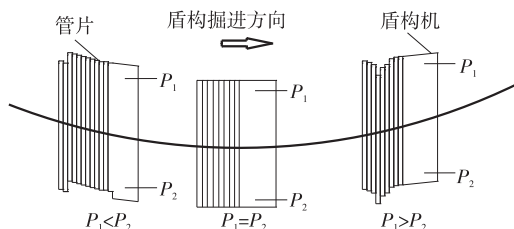


图5 盾构掘进管片受力示意图

在地质条件较复杂的地段,如上软下硬地层等,很容易出现掘进轴线偏差,即“蛇形”现象,需进行盾构纠偏。但也不能大幅度矫正,否则很容易出现管片上浮现象,给盾尾管片拼装和隧道使用带来困难。盾构机一环的纠偏量以不超过 5 mm 为宜,以减少盾构机在推进过程中对地层的扰动,防止出现盾尾钢板拉伤管片、损坏管片止水条等现象。

在复杂地段掘进时,加强盾构姿态监测频率,及时纠偏矫正,是控制管片上浮必不可少的手段。该工程中采用人工监测和隧道自动导向系统相结合的方式对盾构姿态进行控制。自动导向系统配置了导向、自动定位、掘进程序和显示器等(见图 6),能全天候在盾构机主控室动态显示盾构机当前位置与隧道设计轴线之间的偏差,据此调整盾构机掘进方向,使其始终保持在允许偏差范围内。但该系统后视基准点的前移需通过人工测量进行精确定位,为保证推进方向准确可靠,每周进行 2 次人工测量,校核自动导向系统的测量数据并复核盾构机的位置和姿态,确保盾构掘进方向准确。

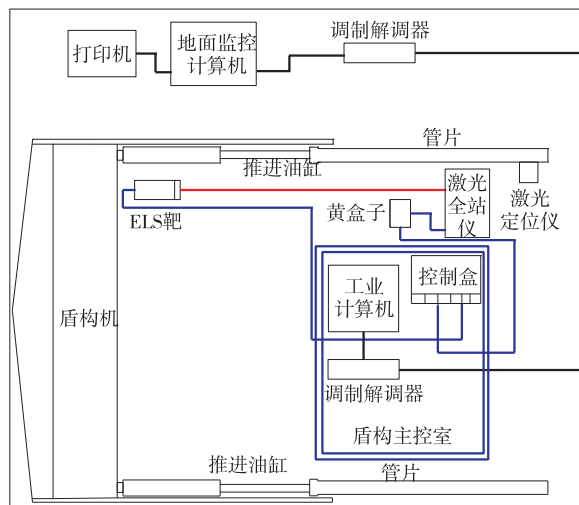


图6 隧道自动导向系统示意图

#### 3.2 满足最小覆土厚度的要求

在实际工程中,若隧道埋深过浅,则可能在顶部

出现冒顶透水事故,故选线中一定要满足最小覆土厚度的要求。关于最小覆土厚度的计算,许多学者进行了研究:叶飞等基于注浆力压力分布情况推导了盾构掘进所需最小覆土厚度计算公式[见式(8)];张庆贺从隧道水底抗浮平衡状态和盾构开挖面平衡状态条件入手,分析并推导了盾构推进时所需最小覆土厚度和阻止隧道上浮所需最小覆土厚度计算公式[见式(9)、式(10)]。

$$h = \frac{2PR_0 \sin\theta - \pi(R_0^2 - R_i^2)\gamma_c}{2R_0 r'} \quad (8)$$

式中: $P$  为注浆压力; $R_0$  为管片外径; $\theta$  为注浆浆液分布区域边界与竖向的夹角; $R_i$  为管片内径; $\gamma'$  为上覆土的浮重度。

$$h = \frac{4P_g/(\delta D^2) - 2c\sqrt{K_p} - H_w\gamma_w}{\gamma_w + \gamma'K_p} - \frac{D}{2} \quad (9)$$

$$h = \frac{\delta R_0^2 \gamma_y - \delta(R_0^2 - R_i^2)\gamma_c}{2R_0 \gamma'} \quad (10)$$

式中: $P_g$  为盾构正面挤压力; $D$  为盾构外径; $c$  为土的粘聚力; $K_p$  为被动土压力; $H_w$  为上覆土表层到水面高度,即水深; $\gamma_y$  为壁后注浆体重度。

在实际中,有时按经验最小覆土厚度不低于  $2D/3$  取值。这里根据上述公式和  $2D/3$  综合比较取最大值。当上覆土过浅时,采取措施进行加固处理。一般处理措施有:

(1) 河底抛土。在河底抛土,可增加覆土厚度。该加固方式节约成本,但适合于深水地段,在浅水区域使用会对通航产生较大影响。著名的德国易北河隧道加固就采用这种方式。

(2) 河底注浆加固。当河水较浅时,注浆加固是首要选择。注浆后,管片上覆土层相当于一个不透水层,水压力与土压力共同作用在管片上,减少了管片的上浮。注浆后,覆土层的粘聚力  $c$  增大,根据式(9), $c$  增大时,盾构推进时所需最小覆土厚度减小;根据式(10),注浆后上覆土实际重度替换为浮重度,阻止隧道上浮所需最小覆土厚度也将减小。因此,河底注浆加固是一种有效的管片抗浮方式,但其工程量较大。

(3) 设置抗浮结构。注浆的同时在管片对应正上方土层加设抗浮板,并在隧道抗浮板两侧用抗浮桩固定(见图7)。

### 3.3 改善管片接头性能

由前述可知,纵向刚度是管片上浮的决定因素,而管片接头性能会对管片纵向有效抗弯刚度产生直

接影响。

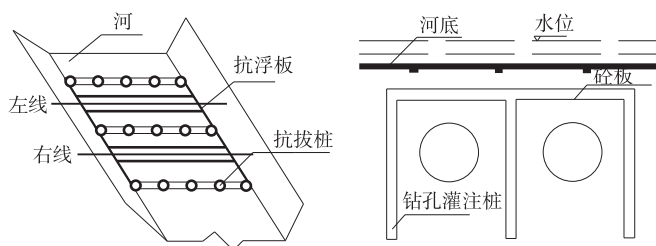


图7 抗浮结构示意图

叶飞等认为在隧道局部抗浮模式中,接头的抗浮作用体现在断面摩擦和螺栓抗剪上;而在隧道整体抗浮中,接头抗浮作用体现在对管片纵向有效抗弯刚度的影响上。

在管片接头设计中,可通过增大螺栓直径、增加纵向螺栓性能和设置剪力销等方式增大抗剪强度,还可在保证螺栓强度的情况下增加螺栓的预加力或换向刚度,使管片之间的摩擦增大,从而提高纵向有效刚度。

### 3.4 控制注浆压力及浆液特性

该工程采用盾尾同步注浆,保证了注浆的时效性。但单液浆初凝时间过长,会造成上浮力的存在时间过长;注浆压力上下相同,容易产生压力差。针对以上弊病,在选用初凝快、早期强度高的惰性双液浆的基础上,使上部注浆压力大于下部,并监测上下部的浆液压力,使其尽量保持一致;若下部浆液压力过大,则打开管片底部的孔道卸压。

### 3.5 合理调节泥水压力

因隧道穿越湘江江底河床,盾构刀盘所面对的地应力并不是一成不变的,随着覆土厚度的改变,泥水压力需合理调节,泥水压力过大或过小对隧道掘进都会产生不利影响。泥水压力过大时,刀盘前方的挤土效应会使管片上浮量增加;泥水压力过小时,容易使土层向洞内产生位移。只有在准确地地质勘测和计算的基础上,才能有效控制管片上浮。

### 3.6 在隧道内堆载

在不影响隧道内运输的情况下,也可采用堆放重物的方式增大管片自重,起到控制管片上浮的作用。当然,隧道内堆放重物要合理,太轻了效果不大,太重了会造成管片下沉。堆载估算公式为:

$$W = \eta(F_{\text{浮}} - G_1 - G_2)$$

式中: $W$  为堆载重量; $\eta$  为安全系数; $F_{\text{浮}}$  为上浮力; $G_1$  为上覆土重力效应产生的压力; $G_2$  为管片自重。

(下转第 186 页)



从表 4 可以看出:在沥青混合料建设过程中,碳排放量最大的是混合料生产阶段,占总碳排放量的 67.88%;其次是原材料生产阶段,占 28.58%。这两阶段是沥青混合料建设过程中的碳排放关键环节。

## 5 结语

该文通过高速公路沥青混合料建设全过程碳排放源调查结果分析,将沥青路面建设全过程划分为 4 个阶段,分析各阶段施工工艺特点并构建沥青混合料建设过程碳排放评价体系,建立碳排放量计算模型,实现碳排放量计算标准化、规范化;确立混合料生产阶段和原材料生产阶段是沥青混合料建设过程碳排放关键环节,对碳排放关键环节进行节能减排技术研究,可有效降低建设过程的总碳排放量。

## 参考文献:

- [1] Schenck R. Using LCA for procurement decisions: a case study performed for the US environmental protection agency[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2010, 19(2).
- [2] Strippel H. Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis: Second Revised Edition[R].

IVL Report, 2001.

- [3] Huang Y, Bird R, Heidrich O. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(2).
- [4] 潘美萍,王端宜.路面寿命周期碳排放评价方法的研究[J].中外公路, 2011, 31(4).
- [5] 孙广远.高速公路建设期内源性碳排放对比分析[J].公路工程, 2013, 38(4).
- [6] 吴军伟.道路工程碳排放量计算与分析模型的发展与应用[J].城市道桥与防洪, 2011(7).
- [7] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [8] Swedish Defence Materiel Administration. Listing of GWP Values as Report IPCC WG1 Edition 1.0[S].
- [9] Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524.
- [10] Roudebush W H. Environmental value engineering (EVE) environmental life cycle assessment of concrete and asphalt highway pavement systems[R]. Portland Cement Association Skokie, 1996.

收稿日期: 2017—09—22

\*\*\*\*\*  
(上接第 177 页)

## 4 结论

(1) 在管片刚度计算上,梁—弹簧模型适用于考虑管片环向性能的情况;三维骨架模型虽然形象具体,但因单元数目过多,参数不明确,计算容易出现不收敛等问题,实用性不强;纵向等效连续化模型将隧道纵向等效为刚度和特性相当的连续梁,计算较合理。

(2) 引入等效地基梁模型和等效纵向刚度的概念,通过模型计算得出管片最大上浮量与实测值较接近,证实文中模型在上浮预测上可靠。

(3) 可通过监测盾构姿态、满足最小覆土厚度、改善管片接头性能、控制注浆过程、调节泥水压力和合理堆载等手段防止和减少管片上浮,保证隧道管片拼装质量。

## 参考文献:

- [1] 杨延栋,陈馈,李凤远,等.全断面硬岩地层盾构隧道管片上浮控制技术[J].隧道建设, 2015, 35(2).

- [2] 段坚堤,傅鹤林,张敬宇,等.浅埋盾构隧道管片设计荷载的确定[J].铁道科学与工程学报, 2014, 11(2).
- [3] 曾格华,夏才初.基于梁—非线性弹簧模型的盾构隧道管片环极限变形特征研究[J].铁道学报, 2017(4).
- [4] 李翔宇,刘国彬,杨潇,等.基于修正纵向等效连续化模型的隧道变形受力研究[J].岩土工程学报, 2014, 36(4).
- [5] 廖少明,徐进,焦齐柱.盾构法隧道管片拼装过程中的衬砌内力解析[J].土木工程学报, 2013, 46(3).
- [6] 徐凌,黄宏伟,罗富荣.软土地层盾构隧道纵向沉降研究进展[J].城市轨道交通研究, 2007(6).
- [7] 叶飞,朱合华,丁文其.考虑管片环间接头抗浮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).
- [8] 殷明伦,张阳玉,王睿.某软土地层盾构隧道管片上浮事故分析[J].市政技术, 2014(5).
- [9] 叶飞,苟长飞,陈治,等.盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J].岩土工程学报, 2014, 36(4).
- [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).

收稿日期: 2017—09—04