

## 盾构隧道穿越含微浅层气地层变形影响因素研究\*

杨 昕<sup>1,2</sup> 洪 义<sup>1</sup> 王立忠<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 310058, 杭州; 2. 重庆大学溧阳智慧城市研究院, 213332, 溧阳)

**摘 要** [目的]我国滨海地区广泛分布浅层气地层,影响地铁隧道工程施工安全。因此,有必要对盾构穿越浅层气地层变形影响因素进行深入研究。[方法]依托杭州地铁1号线盾构隧道下穿萧山机场工程,通过萧山机场附近超前放气工程结果分析了盾构区间浅层气地层埋深及峰值气压分布。根据饱和土和含气土三轴不排水卸荷试验及数值模拟结果,分析了微浅层气地层盾构开挖施工风险,提出了风险控制因素。选取典型监测断面,分析了地面沉降与盾构施工过程的关系,得到了盾构隧道在含气软土地层施工时地层损失沉降和固结沉降界限值。基于随机森林模型分析了盾构在含气土层施工中盾构掘进参数对地面沉降重要性影响。[结果及结论]该盾构区间浅层气富集层埋深在20~30 m范围内,且峰值气压在0.01 MPa左右,属于微浅层气层;盾构穿越含气地层施工过程中应特别注重土仓压力控制,降低开挖面含气土层液化失稳、地层坍塌等风险;盾构在含气地层开挖时,取盾尾离开2~3 d划分地层损失沉降和固结沉降;盾构掘进参数对地面沉降影响重要性排序依次为土仓压力、扭矩、注浆量、推力、出土量、推进速度。

**关键词** 盾构隧道;微浅层气地层;地层变形;影响因素  
**中图分类号** U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230582

## Deformation Influencing Factor Analysis for Shield Tunnelling under Micro-shallow Gas Strata

YANG Xin<sup>1,2</sup>, HONG Yi<sup>1</sup>, WANG Lizhong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 310058, Hangzhou, China; 2. Liyang Institute for Smart City of Chongqing University, 213332, Liyang, China)

**Abstract** [Objective] Shallow gas stratum is widely distributed in coastal areas of China, affecting the safety of subway tunnel construction. Therefore, it is necessary to deeply study the factors influencing deformation of shield tunneling through shallow gas stratum. [Method] Relying on the shield tunnel project of Hangzhou Metro Line 1 crossing under Xiaoshan Airport, the buried depth and peak gas pressure distribution of shallow gas strata in the shield section are analyzed

through the results of the advanced gas releasing project near Xiaoshan Airport. Based on triaxial undrained unloading test of saturated soil and gas-bearing soil, as well as the numerical simulation results, the excavation risks of shield construction in micro-shallow gas strata are analyzed, and risk control factors are proposed. A typical monitoring section is selected to analyze the relationship between land subsidence and shield construction process, determining the boundary values of stratum loss settlement and consolidation settlement during shield tunnel construction in gas-bearing soft soil strata. The importance of shield tunneling parameters on land subsidence during shield construction in gas-bearing soil layers is analyzed based on a random forest model. [Result & Conclusion] The buried depth of the shallow gas-rich layer in the shield section ranges is from 20 m to 30 m, with a peak gas pressure of approximately 0.01 MPa, indicating a micro-shallow gas layer. During shield construction crossing gas-bearing strata, special attentions should be paid to the pressure control in the earth chamber to reduce the risks of liquefaction instability and stratum collapse in the gas-bearing soil at the excavation face. When excavating in gas-bearing strata, the stratum loss settlement and consolidation settlement should be distinguished 2 to 3 days later after the shield tail has left. The importance ranking of shield tunneling parameters affecting land subsidence is as follows: earth chamber pressure, torque, grouting volume, thrust, soil discharge volume, and advancing speed.

**Key words** shield tunnel; micro-shallow gas strata; stratum deformation; influencing factor

滨海软土地层广泛分布浅层气,严重威胁滨海城市的地下工程建设<sup>[1-3]</sup>。盾构隧道穿越含气地层过程中,若施工措施不当,浅层气的存在易引发安全事故。上海长江入海口某隧道施工过程中沼气涌入隧道内部,使隧道下沉,严重段发生断裂,造成重大损失<sup>[4-5]</sup>。杭州地铁1号线(以下简称“1号线”)勘察和施工过程中,发生触探孔气体喷发并燃

\* 国家自然科学基金项目(52122906);浙江省自然科学基金项目(LHZ20E090001)

烧,基坑底板喷气冒砂等现象,影响勘探及施工作业进度<sup>[6]</sup>。

针对盾构隧道在含气地层施工问题,大量学者展开相关研究。文献[7]分析了上海浅层气成因、组成及分布,提出了盾构隧道穿越含浅层气地层时的施工措施。文献[8-9]分析了高压浅层气对地铁建设的影响,从勘探、施工前准备、施工及运营等阶段阐述了针对浅层气危害的防治措施。文献[10-11]总结了当前我国含气土盾构工程案例,分析了浅层气对工程影响;同时考虑挤土效应、土体软化及注浆压力等因素,针对放气后的含气地层盾构施工,提出了施工引起的土体变形理论计算公式。

当前研究中,主要针对高压浅层气对盾构隧道影响及控制对策开展研究,鲜有针对盾构穿越微浅层气地层风险分析,未有针对盾构隧道穿越含气地层土体沉降及盾构掘进参数实测数据分析。因此,本文依1号线盾构隧道下穿机场停机坪下方含微浅层气地层实际工程,基于放气工程结果获得了浅层气分布及峰值气压,根据饱和土和含气土不排水卸荷三轴数据对盾构穿越微浅层气地层进行了风险分析;分析了盾构穿越微浅层气地层地面沉降监测数据,并基于机器学习算法研究了盾构施工掘进参数对地面沉降重要性影响。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况及重难点

1号线萧山机场站—机场风井站盾构隧道区间(以下简称“萧机盾构隧道区间”)采用土压平衡盾构法施工,自萧山机场航站楼,穿越机场停机坪、机场滑行道,至机场风井。本文研究的萧机盾构隧道区间左线长度约为1 348 m(共1 124环),埋深为16~22 m。萧机盾构隧道区间平面图如图1所示。

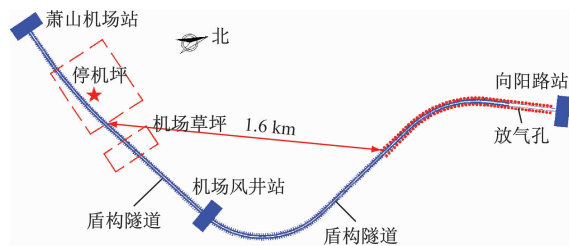


图1 萧机盾构隧道区间平面图

Fig. 1 Plan of Xiaoshan Airport Station shield tunnel interval

根据前期地质勘察及相关研究<sup>[12]</sup>发现,萧山机

场处于杭州湾大型浅层气田范围内,相邻九堡-下沙、义盛两大浅层气田。由于萧山机场为运营状态,因此机场停机坪范围内无法开展超前放气工程,即盾构隧道施工将穿越含浅层气地层,且地面沉降不得超过2 mm/d,累计沉降不超过10 mm,为工程重难点区域。

### 1.2 地质条件

萧机盾构隧道区间左线沿线地质纵剖面图如图2所示。该盾构隧道区间左线K51+586.690—K51+323.346(第168环—第454环)下穿停机坪。隧道上覆土层上层为素填土,其下为③-2、③-5层砂质粉土,下层主要为③-6层粉砂和⑥-1层淤泥质黏土。盾构隧道穿越停机坪段初始第168环—第240环内开挖面地层为③-6层和⑥-1层混合层,第240环—第454环开挖面地层为⑥-1层淤泥质黏土。

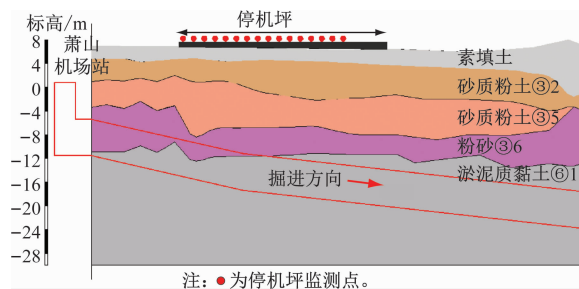


图2 萧机盾构隧道区间地质纵剖面图

Fig. 2 Stratigraphical profile of Xiaoshan Airport Station shield tunnel interval

### 1.3 盾构隧道区间浅层气分布

杭州地区浅层有害气体主要为甲烷,质量分数在90%以上,并含有少量二氧化碳、氮<sup>[13-14]</sup>。由于机场范围内无放气条件,遂选取向阳路站—机场风井站区间超前放气工程结果进行分析。该区间超前放气工程从向阳路站至机场外侧,如图1所示。根据浅层气含气情况,按照孔间距10~20 m在隧道结构线外侧5 m左右范围内共布置112个放气孔,放气孔距离机场停机坪最近处仅约1 600 m。浅层气峰值气压及埋深分布如图3所示。图3中,通过112个沼气放气孔,探测出存在沼气并进行有控排放的放气孔为99个,见气率为88.39%。实测峰值气压范围为0.01~0.04 MPa,其中峰值气压为0.01 MPa的放气孔有87个,占总放气孔的87.88%,气压较小。沼气含气层埋深为15.00~35.00 m,主要分布在20~30 m,为气体富集层。因此,盾构隧道

区间穿越停机坪下方时开挖的土层存在微浅层气层。

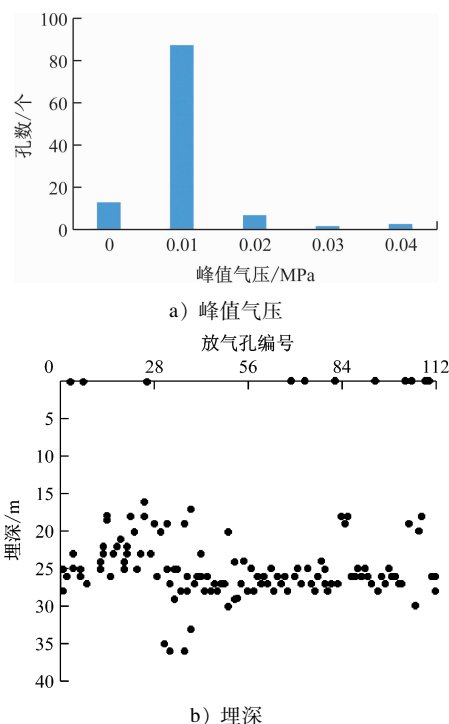


图3 浅层气气压及埋深分布

Fig.3 Distribution of shallow gas pressure and burial depth

## 2 微浅层气地层开挖风险分析

通过本区间地层浅层气分布可知,盾构隧道穿越机场停机坪下方时,地层存在微浅层气层。由于机场为运营状态,放气工程无法开展,因此,盾构隧道需在含微浅层气地层中施工,浅层气对施工安全及地层变形控制存在一定的威胁。

根据文献[15-16]研究结果(见图4):对于饱和土卸荷过程中,孔隙水压力随着总应力的减小呈线性减小趋势;土体总应力减小 800 kPa,孔隙水压力降低约 760 kPa,土体有效应力仅减小约 40 kPa。而对于含气土卸荷过程中,孔隙水压力随着总应力呈非线性减小趋势;土体总应力减小 800 kPa,孔隙水压力降低约 100 kPa(试验结果),土体有效应力减小约 700 kPa,土体强度大大降低。

相较于饱和土地层开挖,含微浅层气地层开挖卸荷过程中,土体有效应力降低,土体强度大大减小,开挖面处含气土层液化而导致开挖面失稳风险提高。因此,盾构穿越含气地层施工过程中,应特别注重对土仓压力的控制,降低开挖面含气土层液化失稳、地层坍塌等风险。

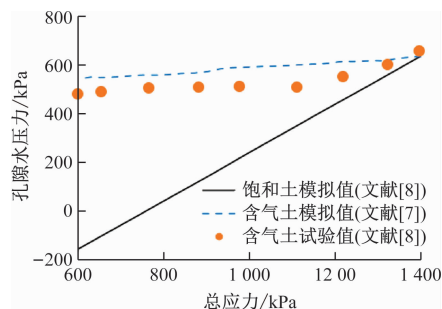


图4 饱和土及含气土卸荷孔隙水压力变化规律

Fig.4 Change pattern of saturated soil and gas-bearing soil unloading pore water pressure

## 3 地面沉降规律分析

### 3.1 监测方案

盾构区间隧道停机坪段地面沉降监测方案平面图如图5所示。沿隧道轴线方向每 10~15 环(1.2 m/环)设置 1 个沉降监测点(L170 表示左线第 170 环)。由于停机坪为运营状态,仅设置纵向地面监测点,无横向地面监测点。监测频率为 2 次/d,地面沉降不得超过 2 mm/d,累计沉降不超过 10 mm。

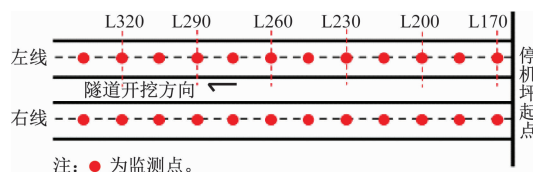


图5 监测方案平面示意图

Fig.5 Planar diagram of monitoring scheme

### 3.2 地面沉降分析

选取 2019 年 L215、L385 监测断面地面沉降监测数据进行分析,累计沉降及沉降速度如图6所示。由图6可知:当盾构隧道开挖断面推进至监测断面前,地面会产生 1~2 mm 沉降(隆起);在隧道刀盘通过至盾尾脱离期间,监测断面处地面产生沉降较小;盾尾脱离监测断面后,较短时间内会产生较大的地面沉降;盾尾脱离一段时间后,出现固结沉降,沉降(隆起)速度逐渐趋于稳定。

盾构施工引起的沉降一般分为地层损失沉降和固结沉降。盾构隧道在黏土地区开挖时,由于黏土黏聚力较大,盾尾脱离断面后,土体不能立即填充盾构超挖及盾尾间隙,具有一定的自稳时间,即土体的时空效应。因此,盾尾脱离后一段时间,地层损失沉降才会结束,转为固结沉降。当盾构

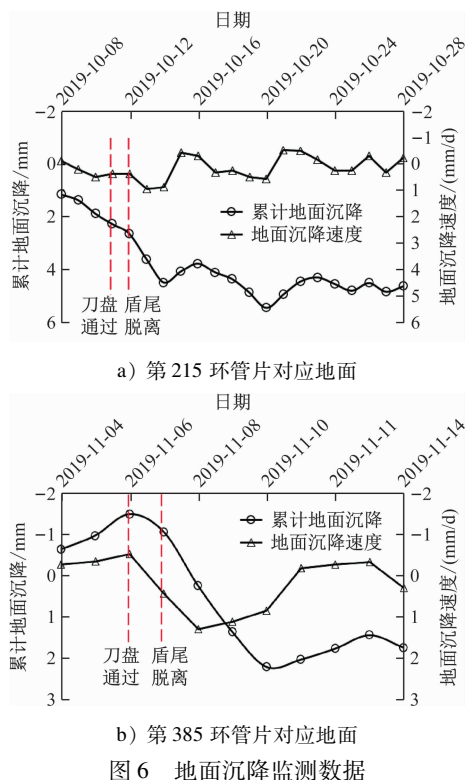


Fig. 6 Land subsidence monitoring data

隧道在软土地区施工时,盾尾脱离后,地面沉降和

沉降速度会陡增,随后,沉降速度会出现转折,开始变慢,该转折点为地层损失沉降和固结沉降界限点。通过分析杭州钱塘江隧道施工监测数据得出,软土地区盾尾离开5 d之前为地层损失沉降。选取盾尾离开4~8 d划分地层损失沉降和固结沉降。

由图6可知:盾构隧道在含气软土地层开挖时,盾尾离开2 d左右地层损失沉降转化为固结沉降,小于文献[10]给出的4~8 d参考值。浅层气生成后,多储存在孔隙较大的砂层透镜体中,然后被黏土包裹封存形成含气土层<sup>[10]</sup>。相较于饱和软土,含气软土黏聚力较小,渗透率较大,施工引起的超孔隙水压消散较快,地层损失沉降完成时间较短。因此,盾构在含气软土地层开挖时,选取盾尾离开2~3 d划分地层损失沉降和固结沉降。

#### 4 盾构掘进参数对地面沉降影响

##### 4.1 盾构掘进参数分析

盾构施工过程中,盾构掘进参数的选取对地面沉降影响较大。监测盾构施工穿越停机坪段(第168环—第454环)过程中盾构推进速度、出土量、注浆量、扭矩、推力及土仓压力变化,如图7所示。

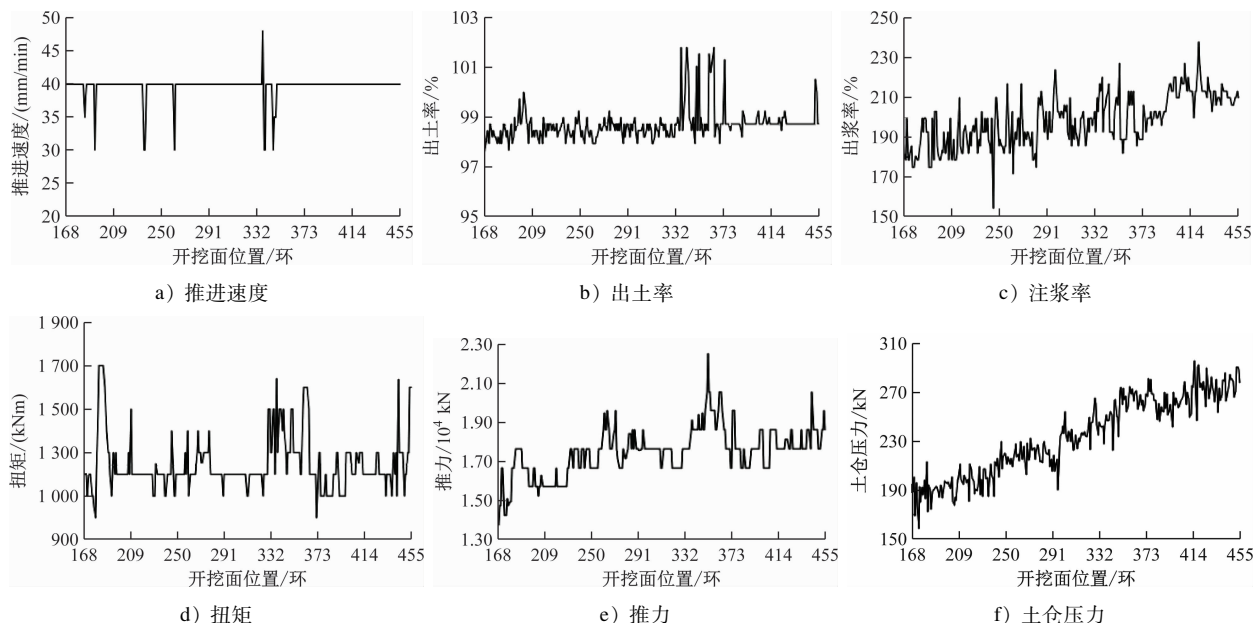


图7 盾构穿越停机坪段掘进参数变化曲线

Fig. 7 Change curves of tunneling parameters of shield crossing apron section

由图7可知:区间隧道内盾构推进速度基本稳定在40 mm/min左右;出土量通过出土率进行表示,出土率( $S_r$ ) = 出土量( $S_e$ )/理论出土量( $S_{et}$ ) ( $S_{et} = \pi D_{exc}^2 L/4$ ,  $D_{exc}$ 为盾构开挖外径, $L$ 为管片宽

度),区间内出土率  $S_r = 97.40\% \sim 101.82\%$ ,平均出土率为98.68%;注浆量通过注浆率进行表示,注浆率( $G_b$ ) = 注浆量( $G$ )/理论注浆量( $G_t$ ) ( $G_t = \pi(D_{exc}^2 - D_{tunnel}^2)L/4$ ,  $D_{tunnel}$ 为隧道外径),区间内注



浆率  $G_b = 153.85\% \sim 237.76\%$ , 平均注浆量为  $198.11\%$ , 且随着盾构施工不断前进, 注浆率呈现逐渐增长的趋势; 区间内扭矩  $T = 1\ 000 \sim 1\ 700\ \text{kNm}$ , 平均扭矩为  $1\ 245\ \text{kNm}$ ; 区间内盾构推力  $N = 9\ 800 \sim 22\ 540\ \text{kN}$ , 平均推力为  $17\ 477\ \text{kN}$ , 且盾构推力随着施工不断前进逐渐增长。盾构土仓压力如图 7 f) 所示。盾构土仓压力为上、中、下部盾构土仓压力平均值。盾构隧道穿越停机坪下方时, 土仓压力在  $180 \sim 300\ \text{kPa}$  范围内, 且随着盾构施工不断前进, 土仓压力近似线性增长。

#### 4.2 基于随机森林模型变量重要性评价原理

随机森林算法是一种通过集成多个决策树预测进行分类或回归的集成算法。随机森林算法能够随机选取子样本, 并随机生成若干决策树, 降低决策树之间的相关性, 提高预测准确性。本文采用基尼指数作为节点分裂原则。通过计算基尼指数变化量评价特征变量对决策树观测值的重要性, 该值越大表示该特征标量越重要。

基尼指数  $a(p_i)$  定义为:

$$a(p_i) = \sum_{i=1}^q (p_i(1 - p_i)) \quad (1)$$

式中:

$p_i$ ——样本特征变量为  $i$  的概率。

样本特征变量  $i$  在节点  $m$  上的重要性  $V_{i,m}$ :

$$V_{i,m} = a_{i,m} - a_{i,l} - a_{i,r} \quad (2)$$

式中:

$a_{i,m}$ ——分枝前节点基尼指数;

$a_{i,l}, a_{i,r}$ ——分枝后两个新节点的基尼指数。

样本特征变量  $i$  在第  $j$  棵树的重要性  $V_{i,j}$ :

$$V_{i,j} = \sum_{m \in M} V_{i,m} \quad (3)$$

式中:

$M$ ——特征变量节点集。

假设有  $n$  棵决策树, 则样本特征变量  $i$  在  $n$  棵树的重要性  $V_i$  为:

$$V_i = \sum_{j=1}^n V_{i,j} \quad (4)$$

将样本特征变量  $i$  重要性评分量纲一化后得到  $V$ :

$$V = \frac{V_i}{\sum_i V_i} \quad (5)$$

#### 4.3 结果分析

采用随机森林模型分析盾构掘进参数对地面

沉降影响步骤如下: ① 选取盾构穿越停机坪下方时的掘进参数(推进速度、出土量、注浆量、扭矩、推力、土仓压力)作为特征变量, 地面沉降(刀盘推过  $8D$  ( $D$  为盾构开挖直径)后的累计地面沉降)为预测值建立样本集; ② 采用 5 折交叉验证训练随机森林模型, 确定最佳效果下的盾构掘进参数; ③ 建立随机森林模型, 计算模型评估参数; ④ 进行特征变量重要性分析。

图 8 为盾构掘进参数对地面沉降的重要性。由图 8 可知: 盾构掘进参数对地面沉降影响重要性排序分别为土仓压力、扭矩、注浆量、推力、出土量、推进速度。其中, 由于样本数据中, 推进速度基本为  $40\ \text{mm/min}$  (占总数据量的  $94\%$ ), 近似为恒定值, 从而导致推进速度特征重要性值为 0。

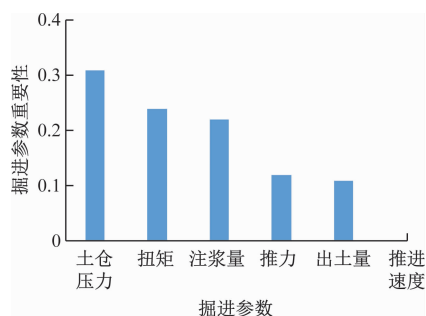


图 8 盾构掘进参数对地面沉降的重要性

Fig. 8 Importance of shield tunneling parameters on land subsidence

## 5 结论

1) 通过分析萧山机场附近放气工程数据得出浅层气地层埋深及峰值气压分布。含气地层埋深为  $15 \sim 35\ \text{m}$ , 其中埋深  $20 \sim 30\ \text{m}$  为浅层气富集区域; 实测峰值气压在  $0.01 \sim 0.04\ \text{MPa}$  范围内。

2) 研究了盾构穿越含微浅层气地层的开挖风险及控制策略。相较于饱和土地层开挖, 含微浅层气地层开挖卸荷过程中, 土体有效应力降低, 土体强度大大减小, 开挖面处含气土层液化而导致开挖面失稳风险提高。盾构穿越含气地层施工过程中, 应特别注重对土仓压力的控制, 降低开挖面含气土层液化失稳、地层坍塌等风险。

3) 选取典型监测断面, 分析了盾构隧道施工过程中地面变形特性。盾构隧道在含气软土地层施工时, 盾尾离开监测断面  $2\ \text{d}$  内地面沉降由地层损失引起, 随后转为固结沉降。建议取盾尾离开  $2 \sim 3\ \text{d}$  划分地层损失沉降和固结沉降, 该值小于饱和软

土施工地层损失沉降和固结沉降界限参考值。

4) 基于随机森林模型分析了盾构在含气土层施工时的盾构掘进参数对地面沉降重要性影响。盾构掘进参数对地面沉降影响重要性排序依次为土仓压力、扭矩、注浆量、推力、出土量、推进速度。

## 参考文献

- [1] 王勇, 孔令伟, 郭爱国. 有控放气措施下含浅层气地层的一维变形分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 241.  
WANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Analysis of one-dimensional deformation of shallow gassy stratum caused by controlling gas release [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 241.
- [2] ZHANG G, ZHANG J, LIU S, et al. Methane in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent marine area: riverine input, sediment release and atmospheric fluxes[J]. Biogeochemistry, 2008, 91(1): 71.
- [3] FIGUEIREDO A G, NITTROUER C A, DE ALENCAR COSTA E. Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta[J]. Geo-Marine Letters, 1996, 16(1): 31.
- [4] 唐益群, 叶为民, 张庆贺. 长江口软土层中沼气与隧道安全施工技术研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(4): 465.  
TANG Yiqun, YE Weimin, ZHANG Qinghe. Marsh gas in soft stratum at the estuary of the Yangtse River and safety measures of construction of the tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1996, 24(4): 465.
- [5] 周殷康, 阎长虹, 李学乾, 等. 第四系全新统软土地层中浅层气空间分布及其控灾特征[J]. 工程勘察, 2016, 44(5): 17.  
ZHOU Yinkang, YAN Changhong, LI Xueqian, et al. The spatial distribution characteristics of shallow gas in soft soil layer of Quaternary Holocene and its effect on geological hazard [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(5): 17.
- [6] 赵小辉. 杭州浅层有害气体对地铁建设的影响[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(9): 203.  
ZHAO Xiaohui. Influence of shallow harmful gas on metro construction in Hangzhou[J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(9): 203.
- [7] TANG Y Q, YE W M, HUANG Y. Marsh gas in shallow soils and safety measures for tunnel construction[J]. Engineering Geology, 2003, 67(3/4): 373.
- [8] 郭爱国, 沈林冲, 张金荣, 等. 浅层气对杭州地铁施工的影响模式分析[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 78.  
GUO Aiguo, SHEN Linchong, ZHANG Jinrong, et al. Analysis of influence mode of shallow gas on construction of Hangzhou Metro[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(9): 78.
- [9] 郭爱国, 孔令伟, 沈林冲, 等. 地铁建设中浅层气危害防治对策研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 769.  
GUO Aiguo, KONG Lingwei, SHEN Linchong, et al. Study of disaster countermeasures of shallow gas in metro construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 769.
- [10] 丁智, 何晨阳, 董毓庆, 等. 含气地层盾构施工引起的土体变形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2330.  
DING Zhi, HE Chenyang, DONG Yuqing, et al. Theoretical research on soil deformation caused by shield construction in gas-bearing stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2330.
- [11] 丁智, 何晨阳, 张霄, 等. 含气土盾构施工影响及控制技术展望[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 9.  
DING Zhi, HE Chenyang, ZHANG Xiao, et al. An outlook for researches on the impact and control technology of shield construction in gassy soils [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 9.
- [12] XU Y S, WU H N, SHEN J S, et al. Risk and impacts on the environment of free-phase biogas in quaternary deposits along the Coastal Region of Shanghai[J]. Ocean Engineering, 2017, 137: 129.
- [13] 林春明, 李广月, 卓弘春, 等. 杭州湾地区晚第四纪下切河谷充填物沉积相与浅层生物气勘探[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 12.  
LIN Chunming, LI Guangyue, ZHUO Hongchun, et al. Sedimentary facies of incised valley fillings of the Late Quaternary in Hangzhou Bay area and shallow biogenic gas exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 12.
- [14] 陈少平, 孙家振, 沈传波. 杭州湾入海口处浅层气成因与类型[J]. 重庆石油高等专科学校学报(自然科学版), 2003(2): 30.  
CHEN Shaoping, SUN Jiazhen, SHEN Chuanbo. Analysis on the cause of shallow layer gas at the entrance of Hangzhou Gulf and its types [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2003(2): 30.
- [15] MABROUK A, ROWE R K. Effect of gassy sand lenses on a deep excavation in a clayey soil[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3/4): 292.
- [16] SOBKOWICZ J C. The mechanics of gassy sediments[D]. Edmonton: University of Alberta, 1982.

· 收稿日期:2023-05-24 修回日期:2023-12-25 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-05-24 Revised:2023-12-25 Published:2025-06-10  
· 第一作者:杨昕,博士,yangxin\_zju@foxmail.com  
通信作者:洪义,教授,yi\_hong@zju.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license