

# 软土地区盾构侧穿 SF 油罐扰动控制数值分析

文明<sup>1,2</sup>, 郭静<sup>3</sup>, 景浩<sup>4</sup>, 包晓红<sup>4</sup>, 柳献<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 宁波市市域铁路投资发展有限公司, 浙江 宁波 315000; 3. 镇海石化工程股份有限公司, 浙江 宁波 315000; 4. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 以宁波轨道交通 3 号线二期盾构隧道工程为背景, 对软土地区盾构掘进过程中引起的 SF 双层油罐变形及应力分布规律进行数值模拟分析。结果表明, 合理选取土体损失率、正面附加推力等参数值可有效控制油罐扰动。罐区变形以竖向变形为主, 隆起量极值位于距离隧道较近的油罐, 沉降量极值位于中心油罐区。距离盾构隧道较近的油罐壁出现较大附加应力, 油罐各项应力值均小于罐体材料许用应力。油罐满载工况下变形及附加应力值均低于空载工况。现场监测数据时程变化趋势与数值分析结果一致, 地表变形量及变形速率满足监测要求。

**关键词:** 盾构隧道; 双层油罐; 扰动控制; 数值模拟; 应力分析  
**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A

## Numerical Analysis of Disturbance Control of Shield Side Crossing SF Oil Tank in Soft Soil Area

WEN Ming<sup>1,2</sup>, GUO Jing<sup>3</sup>, JING Hao<sup>4</sup>, BAO Xiaohong<sup>4</sup>, LIU Xian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Ningbo Shiyu Railway Investment Development Co. Ltd., Ningbo 315000, China; 3. Zhenhai Petrochemical Engineering Co. Ltd., Ningbo 315000, China; 4. Ningbo Rail Transit Group Co. Ltd., Construction Branch, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Based on the second phase shield tunneling project of Ningbo Rail Transit Line 3, the deformation and stress distribution of SF double-layer oil tank caused by shield tunneling in soft soil area are analyzed by numerical simulation. The results show that the disturbance of oil tank can be effectively controlled by reasonably selecting the parameters such as soil loss rate and frontal additional thrust. The tank farm deformation is mainly vertical deformation, the extreme value of uplift is located in the oil tank near the tunnel, and the extreme value of

settlement is located in the central oil tank farm. The oil tank wall close to the shield tunnel has a large additional stress, and all stress values of the oil tank are less than the allowable stress of the tank material. The deformation and additional stress values of the oil tank under full load condition are lower than those under no-load condition. The time history change trend of field monitoring data is consistent with the numerical analysis results, and the surface deformation amount and deformation rate meet the monitoring requirements.

**Key words:** shield tunnel; double layer oil tank; disturbance control; numerical simulation; stress analysis

盾构隧道掘进中由于开挖引起地层损失, 盾构与土体相互作用引起地下构筑物受力环境发生变化。盾构施工对地下构筑物影响研究, 理论分析方面, 张琼芳等<sup>[1]</sup>基于 Mindlin 解计算出盾构施工对已建隧道附加应力, 应用 Winkler 地基梁理论得出隧道变形量; 甘晓露等<sup>[2]</sup>采用 Pasternak 弹性地基梁模型和 Loganathan-Polous 解, 提出隧道下穿已建隧道纵向变形简化计算方法; 冯国辉等<sup>[3]</sup>将管线简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置于 Kerr 地基模型上, 利用差分法得到盾构掘进引起上覆管线竖向位移解。数值分析方面, 刘维正等<sup>[4]</sup>建立盾构下穿铁路框架桥数值模型, 研究不同工况下框架桥和轨道的变形受力特性; 丰土根等<sup>[5]</sup>针对盾构隧道侧穿桥梁桩基工程, 进行数值模拟研究加固前后地表沉降、桩基附加力及位移情况; 沈俊等<sup>[6]</sup>通过数值模拟分析叠线盾构下穿并行燃气管线引起管线的变形与受力特征。

对于地下储油罐等敏感地下构筑物, 盾构掘进施工期间若扰动过大, 易造成油管拉裂, 卸油口及检修人孔局部受损致使泥土进入, 严重

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(52078376)

第一作者: 文明(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向主要为盾构隧道工程设计。E-mail: wm145@126.com



论文  
拓展  
介绍

时会出现油品渗漏等事故,施工前应对油罐受扰动情况进行预测分析。康永胜<sup>[7]</sup>结合工程实例利用 ANSYS 对地面和油罐沉降进行计算;师宏耀<sup>[8]</sup>运用 peck 沉降公式针对隧道与油罐距离差异分析油罐沉降规律;胡磊等<sup>[9]</sup>采用 peck 经验公式结合数值模拟方法给出油罐变形数据。盾构掘进过程中破坏地层初始应力场,造成应力重分布,同时材料的应力应变表现为非线性。为全面研究罐体的受扰动状态,考虑各项控制因素影响,解析法无法处理存在一系列自变量的复杂工况,仅能采用数值分析方法。有限元分析作为数值分析方法的一种,其将土体及构件离散成通过节点连接的有限数量的单元,将荷载及边界条件等效加载在单元上,利用应力应变关联的本构关系,将平衡方程转化为线型方程组求解。

本文以宁波市轨道交通 3 号线二期盾构区间侧穿某加油站罐区工程为背景,考虑油罐材料参数影响,分析扰动主要控制因素,采用数值分析方法得出各工况下油罐变形及应力值,得出优化组合工况后分析油罐受扰动引起变形及应力分布情况,并提出施工期间应急控制措施。

## 1 工程概况

本工程盾构机采用小松土压平衡圆形盾构机,主机长 9.055m,平均掘进速度  $12\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。管片内径 5.5m,外径 6.2m,环宽 1.2m,采用通用楔形环错缝拼装。本工程平面及立面布置图如图 1 所示。

埋地罐区设置  $30\text{m}^3$  油罐各 4 只,罐体采用埋地钢—玻璃纤维增强塑料双层油罐(SF 型)。油罐区垫层及回填情况如图 2 所示。

场地土层构成依次为为①<sub>1b</sub>碎石填土、①<sub>3</sub>淤泥质

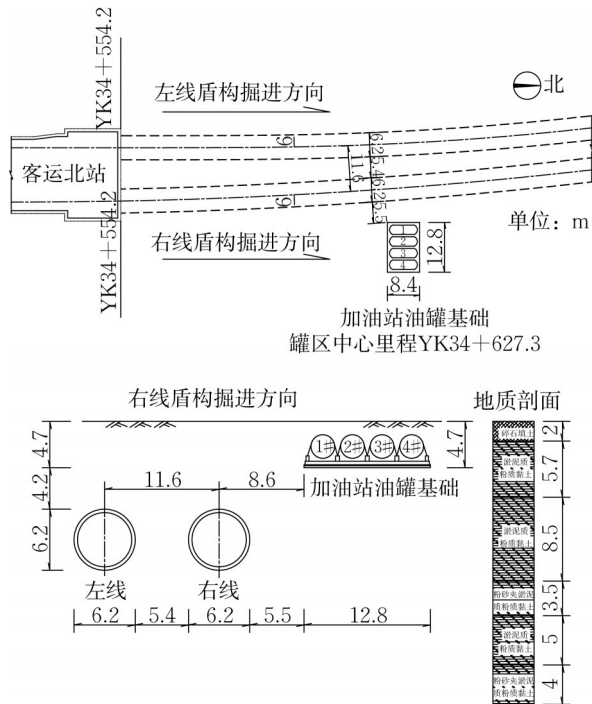


图 1 隧道与油罐区平面及立面布置图(单位:m)

Fig.1 Plan and Elevation Layout of Tunnel and Oil Tank Farm (Unit: m)

粉质黏土、②<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土、③<sub>1</sub>粉砂夹淤泥质粉质黏土、④<sub>1</sub>淤泥质粉质黏土、④<sub>1a</sub>粉砂夹淤泥质粉质黏土、④<sub>1</sub>淤泥质粉质黏土等。

## 2 扰动主要控制因素

盾构掘进对地下构筑物的扰动因素,主要有开挖引起的地层损失、盾构与土体相互作用荷载、注浆压力及注浆材料性能等。

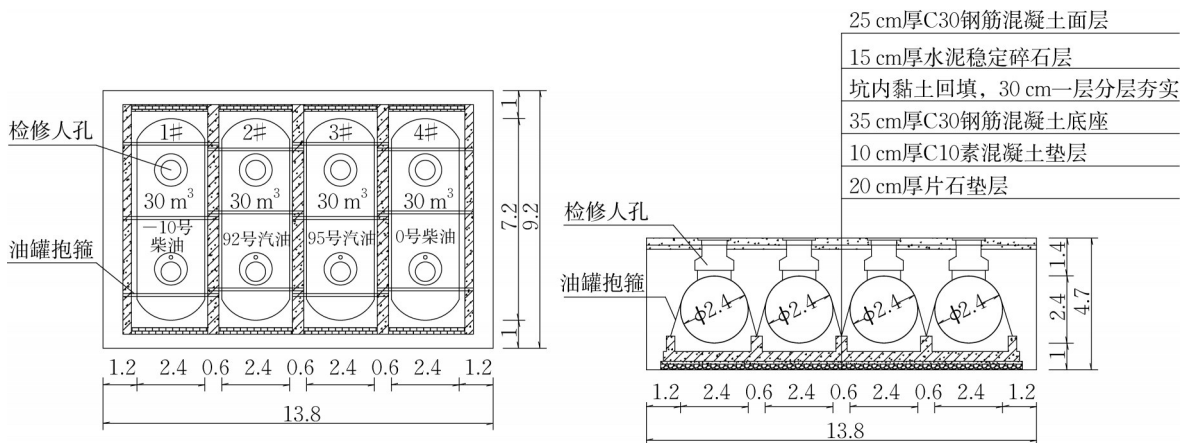


图 2 油罐区布置平面及剖面(单位:m)

Fig.2 Layout Plan and Section of Oil Tank Farm (Unit: m)

## 2.1 地层损失

地层损失是开挖土体体积与建成隧道体积(含隧道周边同步注浆土体体积)之差,常用地层损失率来分析盾构施工对地层扰动特征。地层损失率是指单位土体损失体积与理论开挖土体体积的比值。根据地面沉降实测数据,经 Peck 公式反推导可得到地层损失率取值。宁波软土地区地层损失率约为 0.5%~2%,平均值 1%。根据地层损失率的不同,本文取 4 组工况分析如表 1 所示。

表 1 地层损失率工况

Tab.1 Working conditions of formation loss rate

工况	A	B	C	D
地层损失率/%	0.5	1	1.5	2
损失层厚度/mm	8	15	23	31

## 2.2 盾构与土体作用荷载

盾构与土体相互作用荷载主要有盾构掘进正面附加推力、千斤顶推力引起的盾壳与土体的摩擦力、盾构刀盘扭矩引起的刀盘正面及侧面与土体的摩擦力、同步注浆压力等。根据梁荣柱等<sup>[10]</sup>提出的盾构掘进正面附加推力计算公式,该值主要与盾构掘进速度、刀盘转速相关。根据宁波地区施工经验,穿越敏感构筑物采取的控制变形措施,掘进速度宜控制在 20~40mm·min<sup>-1</sup>,刀盘转速宜控制在 0.9~1.2r·min<sup>-1</sup>。根据各取值组合取 4 组工况分析如表 2 所示。

表 2 正面附加推力工况

Tab.2 Frontal additional thrust conditions

工况	A	B	C	D
掘进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	24	35	45	52
刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1.2	1.0	0.9	0.8
正面附加推力/KPa	50	75	100	125

来弘鹏等<sup>[11]</sup>根据盾构周边土压力分布实际情况,改进摩擦力计算公式并提出盾壳与周边土体的摩擦力表现为上部小、下部大且不均匀分布特点。摩擦力大小与周边土体内摩擦角及容重、隧道埋深具有相关性。考虑模型输入条件进行简化处理,盾壳上部及下部摩擦力取平均值,上部盾壳与土体摩擦力取 53KPa,下部盾壳与土体摩擦力取 80KPa。

根据武崇福等<sup>[12]</sup>理论,刀盘正面及圆周与土体之间作用产生的摩擦力矩是盾构施工引起地层横向位移的原因之一。本文不考虑因左线先掘进扰动土体后,右线掘进时造成土体附加应力引起的摩擦力扭矩增大问题<sup>[13]</sup>,视为双线扭矩数据一致。刀盘正面、侧面与土体摩擦力扭矩可参考钟小春等<sup>[14]</sup>提出

的扭矩计算公式,扭矩数值大小主要与土体容重、隧道埋深、刀盘开口率、刀盘外沿宽度相关,本文中扭矩值取 1 073KN·m。

## 2.3 同步注浆

软土层由于强度指标较低,盾尾从初拼管片脱离后,刀盘超挖形成的土体空隙引起周边土体坍塌至管片上,形成土层松动、土体强度降低等现象,需要通过同步注浆及时填充空隙,避免地层产生较大变形,从而降低对周边地下构筑物的影响。同步注浆主要控制因素有:注浆压力、注浆材料、注浆量、注浆速度及注浆时间等。

根据国内研究表明,注浆压力应与注浆处土体的静止水土压力相当,对于控制地层变形效果最为显著,一般控制在 0.2~0.4MPa。若注浆压力过大,会引起劈裂、漏浆,对地层扰动较大,一般不宜超过 0.4MPa。根据本工程隧道埋深情况,注浆压力应采用太沙基土压力计算方法较合理,计算得注浆口处注浆压力 0.2MPa。为验证注浆压力选取合理性,取 4 组工况分析如表 3 所示。

表 3 注浆压力工况

Tab.3 Grouting pressure conditions

工况	A	B	C	D
注浆压力/MPa	0.15	0.2	0.25	0.3

注浆材料按照注浆方式可分为单液浆、双液浆两类。其中单液浆分为可硬性浆液和惰性浆液。目前宁波地区采用的小松盾构机配置单液同步注浆系统。由于可硬性浆液中掺入水泥等可硬性胶凝材料,强度高且收缩率低,较惰性浆液具有良好的材料性能。鉴于浆液长期硬化后弹性模量可达到 200~400MPa,施工阶段分析中应取浆液初凝阶段弹性模量。根据单液浆配合比不同引起的材料性能差异,以及考虑浆液龄期对分析结论影响,共取 4 组工况如表 4 所示。

表 4 单液浆材料工况

Tab.4 Working conditions of single slurry materials

工况	A	B	C	D
浆液材料	惰性 1	惰性 2	可硬性	—
弹性模量/MPa	10	20	40	100

## 3 数值模拟

数值模型建立简化及假定条件如下:

(1)土体为匀质、各向同性的弹塑性材料。



(2)盾构正面附加推力均匀作用于开挖面。

(3)鉴于仅研究局部范围,不考虑线路纵坡、地面及道路荷载的影响。

(4)仅考虑地下水对土体变形影响,不考虑渗流与固结耦合作用、水位高度变化的影响。

(5)仅考虑盾构施工阶段土体变形,不考虑扰动土体固结引起的长期沉降。

(6)盾构按照平均掘进速度掘进,不考虑土体变形的时间效应。

盾尾注浆层采用均质等代层处理,因软土受扰动引起隧道壁位移较大,等代层厚度将大于盾尾空隙<sup>[15]</sup>,等代层厚度取 170mm。等代层弹性模量及注浆压力变化如表 5 所示。为便于模拟地层损失,采取在同步注浆层外设置一层等厚均匀层,其弹性模量取周边土体的 1%<sup>[16]</sup>。注浆层及土体损失层简化如图 3 所示。

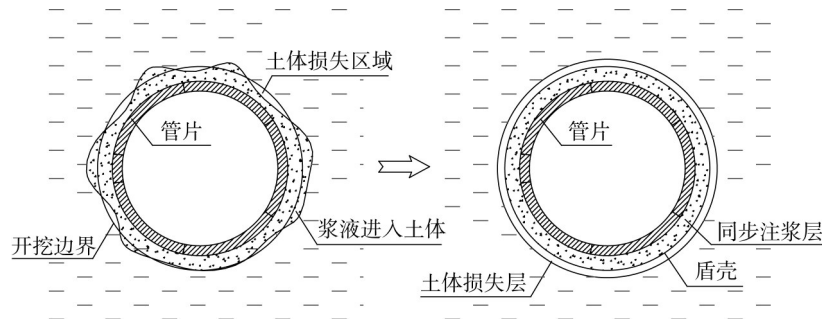


图 3 同步注浆层及土体损失层简化模拟

Fig.3 Simplified simulation diagram of synchronous grouting layer and soil loss layer

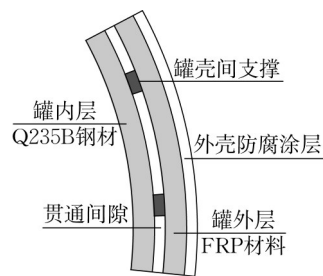


图 4 SF 双层油罐罐体横剖面图

Fig.4 Cross sectional view of SF double-layer oil tank body

表 6 油罐各层材料参数及力学性能表			
Tab.6 Material parameters and mechanical properties of each layer of oil tank			
项目	内层	外层	间隙
密度/kg·m <sup>-3</sup>	7 850	860	850
弹性模量/MPa	2.06×10 <sup>5</sup>	7.0×10 <sup>4</sup>	3.5×10 <sup>3</sup>
泊松比	0.3	0.36	0.35
许用应力/MPa	115	63	—

表 5 等代层弹性模量及注浆压力变化表

Tab.5 Changes in elastic modulus and grouting pressure of equivalent layers

环数	盾尾第 1 环	盾尾第 2 环	盾尾第 3 环	盾尾第 4 环
弹性模量/MPa	0.125a	0.25a	0.5a	a
注浆压力/KPa	b	0.8b	0.4b	0

储油罐罐体材质为钢—玻璃纤维增强塑料双层油罐(SF 型),其内层罐体采用厚 6mmQ235B 钢材,外层罐体采用厚 4mm 玻璃纤维增强塑料(FRP 材料)。外层罐体完整包容内层罐体,罐体间形成连续贯通间隙,并设置可靠支撑。油罐结构如图 4 所示。为便于研究罐体各层受力状态,将内层、外层及间隙分别建立模型<sup>[17]</sup>,假设各层均为各向同性弹性材料。罐体材料性能如表 6 所示。

盾构开挖面前方土体受扰动,采用开挖面前一环设置应力释放单元,采用降低材料弹性模量方法模拟,模量取周围主体的 1%。管片拼装引起的衬砌刚度折减系数 0.85。利用 MIDAS GTS/NX 有限元软件,结合场地土层性质,土层、填土等非线性材料模型采用修正摩尔—库伦(Modified Mohr-Coulomb)弹塑性模型。模型具体参数如表 7 所示<sup>[18]</sup>。

表 7 修正摩尔-库伦模型参数

Tab.7 Revised parameters of the Mohr- Coulomb model

参数	说明	参考值
$E_{50}^{ref}$	标准排水三轴试验中的割线刚度	试验获取
$E_{oed}^{ref}$	主固结仪加载中的切线刚度	试验获取
$E_{ur}^{ref}$	卸载/重新加载刚度	试验获取
$m$	应力水平相关幂指数	1
$c$	有效黏聚力	试验获取
$\varphi$	有效摩擦角	试验获取
$\psi$	最终剪胀角	$\varphi-30^\circ$
$R_f$	破坏比	0.9
$P^{ref}$	参考压力	100
$K_0^{NC}$	正常固结下的侧压力系数	$1-\sin\varphi$

根据数值模拟需求进行室内三轴与固结试验，得到模型参数如表8所示。

表8 土层主要物理参数表  
Tab.8 Main physical parameters of soil layer

编号	类型	厚度/ m	容重/(KN· m <sup>-3</sup> )	泊松比	压缩模 量/MPa	摩擦 角/(°)	黏聚力/ KPa	$E_{50}^{ref}/$ MPa	$E_{oed}^{ref}/$ MPa	$E_{ur}^{ref}/$ MPa	$\psi/^{\circ}$	$K_0^{NC}$
① <sub>1b</sub>	碎石填土	2.0	19.6	0.2	3.0	18	10	3.51	4.16	19.97		0.69
① <sub>3</sub>	淤泥质粉质黏土	5.7	17.8	0.34	2.52	10.1	14	2.89	3.15	18.27		0.82
② <sub>2</sub>	淤泥质粉质黏土	8.5	18	0.32	3.47	15.2	12.7	3.87	4.46	20.07		0.74
③ <sub>1</sub>	粉砂夹淤泥质粉质黏土	3.5	20	0.3	11.0	31.4	4.5	12.10	13.50	56.71	1.4	0.48
④ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	5.0	18.2	0.32	3.25	14.2	13.1	3.86	4.45	25.81		0.75
④ <sub>1a</sub>	粉砂夹淤泥质粉质黏土	4.0	19.2	0.3	4.58	31.5	7.6	4.78	4.95	29.70	1.5	0.48
④ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	14	18.6	0.31	3.78	13.6	16.7	4.20	4.65	28.83		0.76

为消除边界约束对计算结果的影响,模型尺寸选取右线隧道直径5倍范围以外形成的三维实体,模型尺寸为65m×36m×28.7m。建立模型如图5所示。

通过开挖土体、管片、荷载及边界条件激活与钝化实现施工阶段模拟。盾构掘进2环划分为一个施工阶段,共划分42阶段。模型边界内左右线掘进行程均为30环,先掘进左线(1~21阶段),完成后掘进

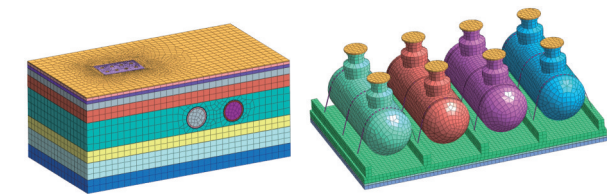


图5 三维实体模型图例  
Fig.5 Legend of 3D solid model

右线(22~42阶段)。主要施工阶段内容见表9。

表9 主要施工阶段内容表  
Tab.9 Main construction stage content table

阶段号		施工内容
左线	右线	
1	22	掘进至第2环,盾壳进入第2环
4	25	掘进至第8环,盾壳完全进入,拼装管片至第2环
5	26	掘进至第10环,拼装管片至第4环,盾壳脱离第2环,盾尾开启同步注浆
6	27	掘进至第12环,掌子面进入罐区,第1环注浆初凝
9	30	掘进至第18环,掌子面通过罐区
15	36	掘进至第30环(模型边界),拼装管片至第24环
19	40	盾尾脱离第30环,洞通
21	42	第30环注浆初凝,施工完成

4 数值分析

针对土体损失、正面附加推力、注浆压力及注浆材料等各参数取值差异,分析各施工阶段油罐竖向变形及应力变化规律。鉴于组合工况较多,受篇幅所限本章节中数据取值作如下限定:

- (1)取4只油罐均位于空载工况下数据。
- (2)分析结果取影响较大的1#油罐内壁数据。
- (3)取优化工况作为分析的基础工况。
- (4)油罐变形取竖向变形数值,受力状态仅取某节点范式等效应力数值。
- (5)考虑油罐各部位受干扰敏感性,竖向变形取值为罐底中心位置,等效应力取值为近隧道一侧罐侧壁中心位置。

4.1 土体损失影响

从数值分析数据以及图表曲线趋势可得下列变化规律:

- (1)油罐空载工况下竖向变形以隆起为主,变形量受罐区与盾构距离影响显著。左线距离罐区较远,隆起变化趋势较小,受模型边界影响在15阶段出现隆起极值。右线盾构介入后隆起增量变化较大,在28阶段(右线掌子面距离罐区中心最近时)出现隆起极大值;之后随着盾构作用退出,受土体损失影响隆起量急剧减小,且在土体损失率较大工况下出现沉降效应。
- (2)左线远离罐区对油罐应力状态干扰相对较小;右线盾构介入后对罐区应力扰动显著增大,在盾构穿越模型区域内出现较大应力增幅,且持续受盾

尾同步注浆影响,等效应力最终阶段达到极值。

如图6所示,随着土体损失率取值差异,油罐竖向变形呈现出梯度变化。最终状态下,损失率0.5%隆起量2.3mm,损失率1%隆起量1.6mm,损失率1.5%沉降量0.1mm,损失率2%沉降量1.7mm。土体损失率对于控制隆沉具有显著影响。随着损失率增大,罐侧等效应力值增大,最终阶段下,损失率0.5%等效应力14.9MPa,损失率2%等效应力19.4MPa。同时较大损失率会引起盾构正上方地表沉降较大,为便于施工控制,建议土体损失率取均值1%。

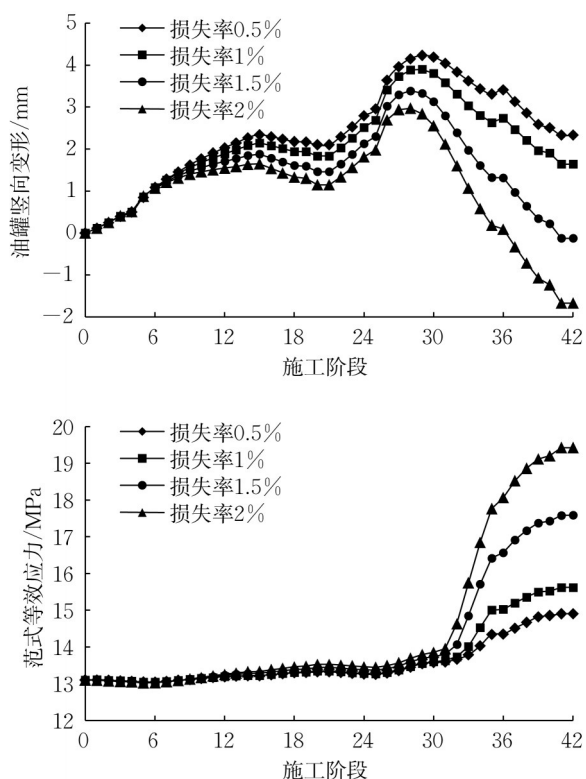


图6 土体损失工况下竖向变形及等效应力趋势

Fig.6 Vertical deformation and equivalent stress trend under soil loss conditions

#### 4.2 正面附加推力影响

如图7所示,正面附加推力对油罐变形及受力状态影响较为显著,各项指标均呈现出梯度变化。在28阶段,推力50KPa隆起量2.4mm,推力75KPa隆起量3.2mm,推力100KPa隆起量3.9mm,推力125KPa隆起量4.2mm。油罐应力在右线掘进后增长显著,最终状态下,较小正面附加推力引起较大应力指标,且随着正面附加推力递减,等效应力呈加速递增趋势。同时较小的正面附加推力需采取较低掘进速度,较高刀盘转速,对油罐扰动时间较长,综合比较

并结合以往工程实践经验,建议正面附加推力值取100KPa。

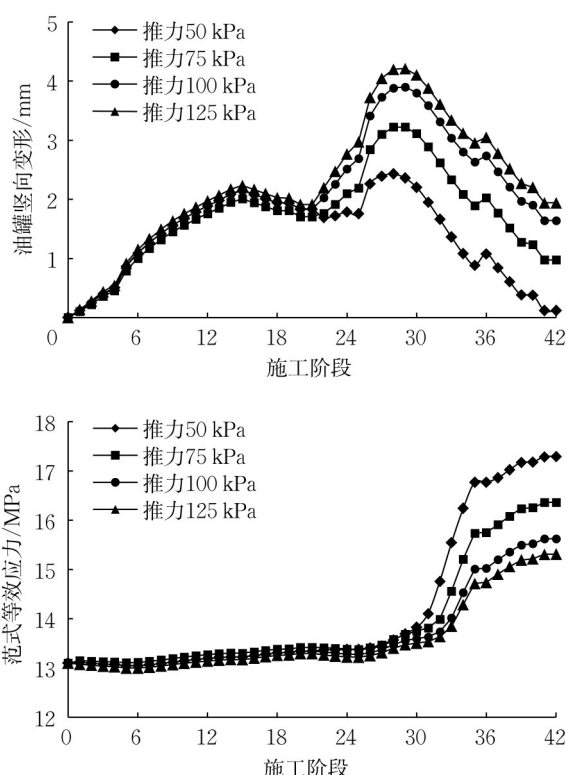


图7 正面附加推力工况下竖向变形及等效应力趋势

Fig.7 Vertical deformation and equivalent stress trend under the condition of positive additional thrust

#### 4.3 注浆压力影响

如图8所示,同步注浆压力取值对油罐变形及应力影响曲线,与正面附加推力取值影响类似。在最终阶段,较小的注浆压力引起较小的竖向变形,但引起较大的罐壁附加等效应力。最终阶段下,注浆压力0.15MPa隆起量1.3mm,等效应力16MPa,盾构施工引起的附加应力2.9MPa;注浆压力0.3MPa隆起量2.8mm,等效应力14.8MPa,盾构施工引起的附加应力1.7MPa。为避免因注浆压力过大对土体引起过大扰动,注浆压力应取较小值,同时尽量降低施工引起的附加应力,建议注浆压力取0.2MPa。

#### 4.4 注浆材料影响

如图9所示,浆液弹性模量取值对于竖向变形有一定影响,弹性模量较大的浆液,引起较小的竖向变形,较大的等效应力。以28阶段为例,弹性模量10MPa隆起量4.2mm,弹性模量20MPa隆起量3.9mm,弹性模量40MPa隆起量3.6mm,弹性模量100MPa隆起量3.2mm。同时较大的弹性模量引起较大的附加应力,最终阶段下,弹性模量10MPa盾构



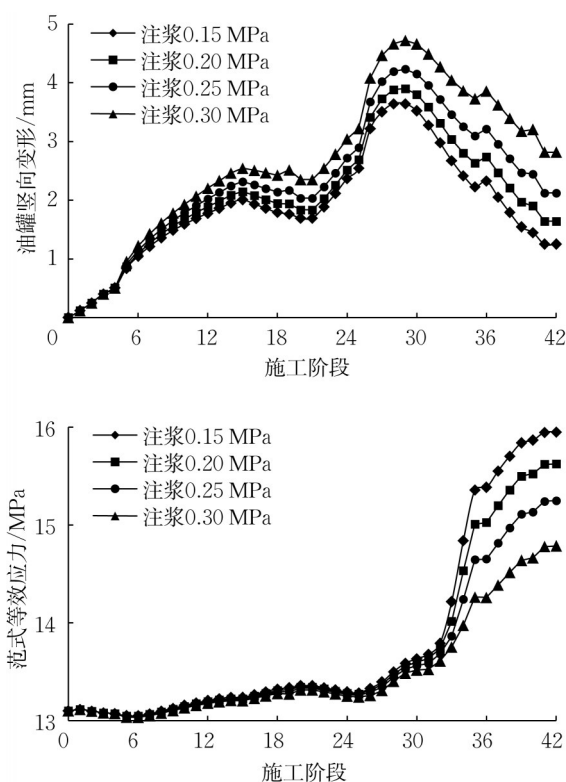


图8 注浆压力工况下竖向变形及等效应力趋势

Fig.8 Vertical deformation and equivalent stress trend under grouting pressure conditions

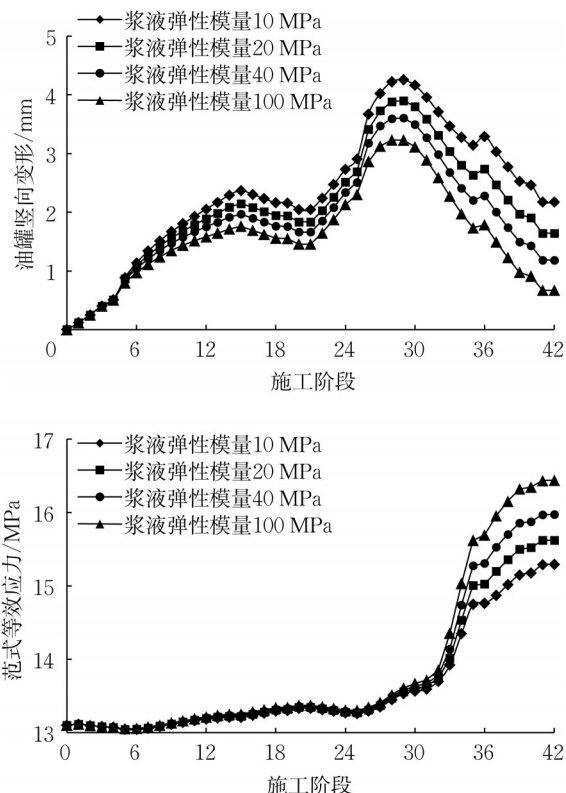


图9 注浆材料工况下竖向变形及等效应力趋势

Fig.9 Vertical deformation and equivalent stress trend of grouting material under working conditions

施工引起的附加应力 2.2MPa,弹性模量 100MPa 盾构施工引起的附加应力 3.3MPa。分析模型上可以得出,注浆材料强度主要影响盾构正上方地表变形,综合考虑变形与产生的附加应力影响,结合宁波地区盾构实施经验,建议浆液弹性模量取 0.2MPa。

## 5 分析结果

根据上述图表趋势,考虑参数取值不同进行组合计算,得到优化工况见表 10。

表 10 优化工况组合

Tab.10 Optimization condition combination

土体损失率	正面附加推力	注浆压力	浆液弹性模量
1%	100KPa	0.2MPa	20MPa

所有油罐空载、优化工况下最终阶段竖向变形及等效应力云图分布如图 10~图 11 所示。

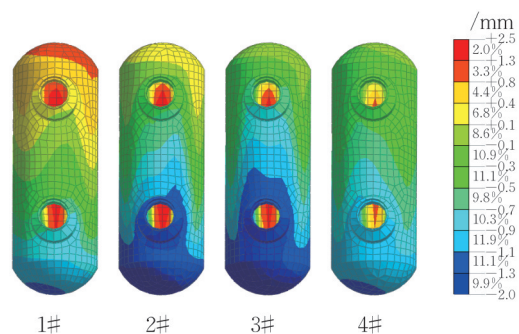


图 10 竖向变形云图

Fig.10 Vertical deformation cloud map

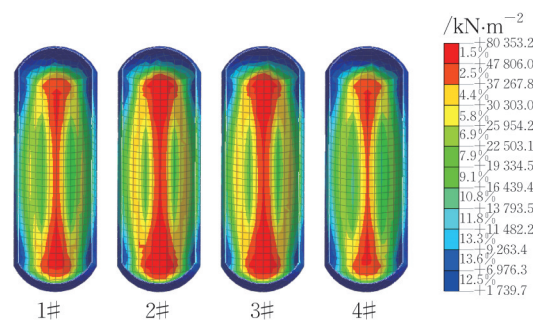


图 11 等效应力罐底透视云图

Fig.11 Perspective Cloud View of Equivalent Stress Tank Bottom

从云图数据可以得到下述变化规律:

(1)油罐变形状态与隧道距离密切相关。左线掘进中罐区整体呈现沉降状态,右线掘进中罐区以隆起状态为主,且距离隧道较近油罐出现范围较广的隆起区域,主要位于罐底及大里程端封头。掌子面通过罐

区后均出现一定程度的沉降效应,其中罐区中心扰动较大,中心油罐较外围油罐出现较大沉降量。

(2)油罐内壁等效应力值远大于外壁,罐体承载以内层钢罐体受力为主。油罐应力状态与隧道距离密切相关,距离隧道较近区域出现较大附加应力,且罐区中心因扰动较大,中心油罐较外侧油罐出现较大附加应力。

优化工况下出现极值时各油罐变形及等效应力数值如表 11 所示。

表 11 罐区变形及应力极值统计表  
Tab.11 Statistical table of tank farm deformation and stress extreme values

油罐状态	项目		1#	2#	3#	4#	位置
空载	沉降/mm		1.2	2.0	2.1	1.5	小里程封头
	隆起/mm		4.2	3.8	3.0	2.0	罐底
	等效应力/MPa	内层	66.9	80.4	77.8	59.7	罐底
		外层	19.4	23.2	22.4	17.5	
	附加等效应力/MPa	内层	21.9	31	28.7	15.3	罐底
		外层	5.7	8.1	7.4	3.9	
满载	沉降/mm		1.9	2.2	2.3	1.9	远隧道侧壁
	隆起/mm		2.4	1.5	0.8	0.4	近隧道侧壁
	等效应力/MPa	内层	59.2	68	62.9	56.1	罐底
		外层	18.6	21	19.8	17.3	
	附加等效应力/MPa	内层	9.7	15.7	12.9	5.7	罐底
		外层	2.8	4.5	3.8	1.5	

6 监测数据分析

客运北站至镇海大道站区间左线隧道于2022年6月30日始发,2022年7月12日穿越罐区;右线于2022

年7月30日始发,2022年8月13日穿越罐区。罐区范围内四周边角设置4个沉降监测点,编号JC1-1~JC1-4。监测布点平面如图12所示。

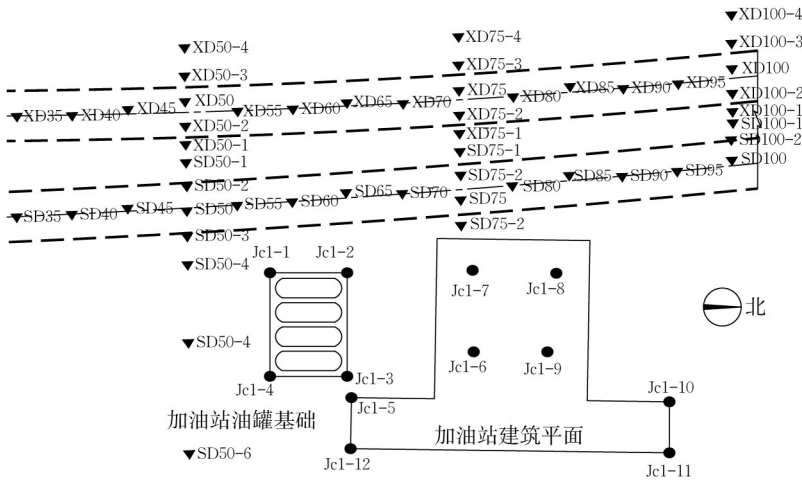


图 12 监测布点平面图  
Fig.12 Monitoring point layout plan

以影响较大的右线掘进数据为例,针对监测数据与数值分析结果作对比。为接近实际情况,数值模型取4只油罐按3/4满载油量工况。在模型范围内共计掘进30环,对应于8月9日至8月14日监测数据,根据每日掘进环数取对应地表竖向变形数据。

由图13可知,各监测点实测数据与模型数据总体沉降变化趋势一致。盾构掘进通过罐区后,JC1-1测

点实测数据0.4mm,模型数据0.6mm;JC1-3测点实测数据2.3mm,模型数据1.8mm,模型变形量与实测数据较为接近。地表最大沉降量2.8mm,最大隆起量2.1mm,最大变形速率1.0mm·d<sup>-1</sup>,均满足监测变形要求。因模型数据未考虑盾构掘进过程中的时空效应,未考虑每日掘进进程的差异,同时监测数据存在一定的初始变形量等原因,引起实测变形量与模拟数值存



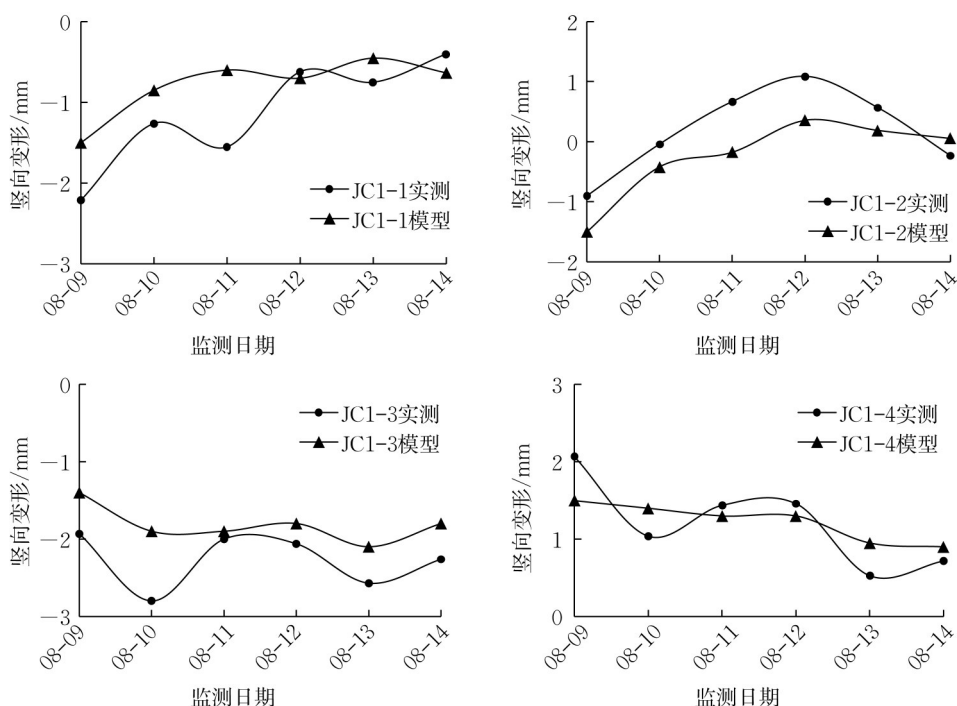


图13 油罐周边监测点竖向变形时程曲线(2022年)

Fig.13 Vertical deformation time history curve of monitoring points around oil tanks (2022)

在一定差异。

## 7 结论

(1)土体损失率、正面附加推力、注浆压力、注浆材料在合理取值区间时,各项数值差异对油罐变形及应力影响的趋势呈现两级分化状态;对油罐采取变形及应力指标双控,选取合理参数可作为油罐扰动控制方法。

(2)罐区变形以竖向为主,空载工况下整体呈现隆起效应;满载工况下经历整体沉降、底部及封头隆起、整体沉降三阶段。距离隧道较近的油罐呈现较大隆起量,中心油罐较外侧油罐呈现较大沉降量。

(3)油罐产生的附加应力值与盾构距离密切相关,距离盾构较近区域出现较大附加应力。油罐各项应力极值均小于罐体材料许用应力,以内层钢罐体受力为主。

(4)油罐满载工况下,变形及附加应力值均低于空载工况。类似项目中若变形数据接近预警值时,可采取油罐内排空燃油后用清水注满作为应急处理措施。

(5)盾构掘进期间采取优化工况后,现场监测数据时程变化趋势与数值分析数据一致,变形量及变形速率均满足监测要求,数值分析方法及扰动控制措施均得到了合理性验证。

## 作者贡献声明:

文明:数值分析,数据处理,论文编撰;  
郭静:罐体结构技术支持,参与数值分析;  
景浩:盾构掘进技术支持,论文校审;  
包晓红:论文研究思路指导,论文校审;  
柳献:提供技术支持和指导意见。

## 参考文献:

- [1] 张琼方,林存刚,丁智,等.盾构近距离下穿引起已建地铁隧道纵向变形理论研究[J].岩土力学,2015,36(S1):568.  
ZHANG Qiongfang, LIN Cungang, DING Zhi, et al. Theoretical study on longitudinal deformation of built subway tunnel caused by shield tunneling under short distance [J]. Geotechnical Mechanics, 2015, 36(S1): 568.
- [2] 甘晓露,俞建霖,龚晓南,等.新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3586.  
GAN Xiaolu, YU Jianlin, GONG Xiaonan, et al. Study on influence of new double track tunnel underpass on existing shield tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39 (S2): 3586.
- [3] 冯国辉,徐长节,郑茗旺,等.侧向土体影响下盾构隧道引起上覆管线变形[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(8):1453.  
FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Deformation of overlying pipeline caused by shield tunnel under the influence of lateral soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2021, 55(8): 1453.
- [4] 刘维正,孙康,戴晓亚,等.地铁盾构长距离下穿对既有铁路框

- 架桥影响的数值与实测分析[J].铁道科学与工程学报,2022,19(1):208.
- LIU Weizheng, SUN Kang, DAI Xiaoya, *et al.* Numerical and measured analysis of the influence of long-distance subway shield underpass on existing railway frame bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(1): 208.
- [5] 丰土根,况梦祥,沈正伟,等.双线盾构隧道侧穿既有桥桩影响分析及加固优化[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(3):55.
- FENG Tugen, KUANG Mengxiang, SHEN Zhengwei, *et al.* Influence analysis and reinforcement optimization of side crossing existing bridge piles of double track shield tunnel [J]. Journal of Hebei Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 38(3): 55.
- [6] 沈俊,晏莉,傅金阳,等.叠线盾构隧道并行下穿燃气管线影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):449.
- SHEN Jun, YAN Li, FU Jinyang, *et al.* Influence analysis of parallel underpass gas pipeline of stacked shield tunnel [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 449.
- [7] 康永胜.郑州地铁盾构隧道下穿加油站沉降分析[J].隧道建设,2015,35(8):766.
- KANG Yongsheng. Settlement analysis of gas station under shield tunnel of Zhengzhou Metro [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(8): 766.
- [8] 师宏耀.盾构隧道侧穿加油站风险控制及地表沉降预测[J].建筑工程技术与设计,2017(16):2254.
- SHI Hongyao. Risk control and surface settlement prediction of side crossing gas station of shield tunnel [J]. Construction Engineering Technology and Design, 2017(16): 2254.
- [9] 胡磊,卓旭炆,张志华.地铁盾构垂直下穿加油站风险分析及控制措施研究[J].现代城市轨道交通,2021(2):56.
- HU Lei, ZHUO Xuyang, ZHANG Zhihua. Study on risk analysis and control measures of subway shield vertical underpass gas station [J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(2): 56.
- [10] 梁荣柱,夏唐代,林存刚,等.盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3):583.
- LIANG Rongzhu, XIA Tangtang, LIN Cungan, *et al.* Analysis of surface deformation and deep soil horizontal displacement caused by shield tunneling [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 583.
- [11] 来弘鹏,王腾腾,张林杰,等.考虑盾壳与土体摩擦力的盾构下穿既有地铁隧道施工控制研究[J].隧道建设,2021,41(5):729.
- LAI Hongpeng, WANG Tengpeng, ZHANG Linjie, *et al.* Study on construction control of shield tunneling under existing metro considering friction between shield shell and soil [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 729.
- [12] 武崇福,魏超,曹海莹,等.考虑刀盘摩阻因素的盾构施工引起地层横向位移分析[J].中国公路学报,2018,31(10):197.
- WU Chongfu, WEI Chao, CAO Haiying, *et al.* Analysis of lateral displacement caused by shield construction considering the friction factor of cutter head [J]. China Journal of Highways, 2018, 31(10): 197.
- [13] 魏新江,王凡勇,丁智,等.软土区盾构刀盘扭矩分析及对地表变形影响[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(6):1491.
- WEI Xinjiang, WANG Fanyong, DING Zhi, *et al.* Torque analysis of shield cutter head in soft soil area and its influence on surface deformation [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2018, 49(6): 1491.
- [14] 钟小春,林键,刘洪忠.土压平衡式盾构机刀盘扭矩力学模型研究[C]//第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集(下册).北京:中国水利学会,2006:67-69.
- ZHONG Xiaochun, LIN Jian, LIU Hongzhong. Study on the torque mechanical model of the cutter head of EPB shield machine [C]// Proceedings of the first China Hydraulic and Hydroelectric Geomechanics and Engineering Symposium (Volume II). Beijing: China Hydraulic Society, 2006: 67-69.
- [15] 张云,殷宗泽,徐永福.盾构法隧道引起的地表变形分析[J].岩石力学与工程学报,2002(3):388.
- ZHANG Yun, YIN Zongze, XU Yongfu. Analysis of ground deformation caused by shield tunneling [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(3): 388.
- [16] 李琳,崔惟超,董光辉,等.盾构施工引起周围土体位移的数值研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(5):755.
- LI Lin, CUI Weichao, DONG Guanghui, *et al.* numerical study on surrounding soil displacement caused by shield construction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 755.
- [17] 宋仕强,张世富,张起欣.SF双层油罐结构强度有限元分析[J].石油化工设备技术,2014(1):14.
- SONG Shiqiang, ZHANG Shifu, ZHANG Qixin. Finite element analysis of structural strength of SF double-layer oil tank [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2014(1): 14.
- [18] 胡建林,孙利成,崔宏环,等.修正摩尔库伦模型下的深基坑变形数值分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(2):134.
- HU Jianlin, SUN Licheng, CUI Honghuan, *et al.* Numerical analysis of deep foundation pit deformation under modified Mohr-Coulomb Model [J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2021, 40(2): 134.