

## 矩形顶管端头土体加固模型试验与沉降控制研究

巴国辉<sup>1</sup>,董航<sup>1</sup>,曹广勇<sup>1,2\*</sup>

(1.安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥 230601;2.安徽建筑大学 安徽省岩土工程智能建造与  
灾变防控重点实验室,安徽 合肥 230601)

**摘要:** 为研究矩形顶管施工过程中工作井端头土体稳定性及其对工程安全的影响,以及端头土体加固不足引发的地表沉降等问题,依托合肥市龙岗路综合管廊项目,制作了几何相似比为1:20的缩尺矩形顶管模型,开展模型试验和模拟验证。通过模型试验,研究了不同加固长度对土体稳定性的影响。结果表明:对矩形顶管端头土体进行加固可有效控制地表产生的沉降;矩形顶管顶进时,工作井前端地表沉降呈“V”形分布;当加固长度由0.30 m增至0.34 m时,地表沉降最大值仅降低了7.14%,继续增加加固长度效果趋缓;工作井侧向土压力集中在洞口上侧区域,且随顶进距离的增加而增大,在顶进400 mm时达到最大值,即647.435 kPa。研究揭示了加固长度与沉降控制的非线性关系,建议6 m为实际工程经济加固长度。

**关键词:** 矩形顶管;端头加固;模型试验;沉降控制;土压力

**中图分类号:** TU94

**文献标识码:** A

## Model Test and Settlement Control Research on Soil Reinforcement at the End of Rectangular Pipe Jacking

BA Guohui<sup>1</sup>, DONG Hang<sup>1</sup>, CAO Guangyong<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Disaster Prevention, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China)

**Abstract:** This study aims to investigate the soil stability at the end of working well during rectangular pipe jacking construction and its impacts on engineering safety, as well as the ground settlement issues induced by insufficient soil reinforcement at the end. Based on the Longgang Road utility tunnel project in Hefei, a scaled model of rectangular pipe jacking with a geometric similarity ratio of 1:20 was fabricated, and model tests together with simulation verification were carried out to explore the influence of different reinforcement lengths on soil stability. The test results indicate that the soil reinforcement at the end can effectively reduce the ground settlement. The ground settlement at the front of the working well presents a V-shaped distribution during pipe jacking. When the reinforcement length increases from 0.30 m to 0.34 m, the maximum ground settlement is only reduced by 7.14%, and the improvement effect tends to be insignificant with further increase of the reinforcement length. The lateral earth pressure of the working well is concentrated in the upper area of the tunnel opening and increases with the increase of the jacking distance, reaching a maximum value of 647.435 kPa at the jacking distance of 400 mm. This study reveals the nonlinear relationship between reinforcement length and settlement control, and proposes 6 m as the economical reinforcement length for practical engineering applications.

**Key words:** rectangular pipe jacking; end reinforcement; model test; settlement control; earth pressure

收稿日期:2025-05-28 修回日期:2025-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52304073)

第一作者:巴国辉(1999—),男,安徽黄山人,硕士研究生,从事地下结构方面的研究。

\*通信作者:曹广勇(1973—),男,安徽阜阳人,博士,讲师,从事地下结构方面的研究。

目前,城市地下工程日益增多,且常需穿越复杂区域,矩形顶管技术因断面利用率高、施工扰动小而被广泛应用。大断面矩形顶管始发端头土体需同时承受土压、水压与机械顶推力,受力复杂,该区域加固是施工的核心环节。在顶管始发破洞与掘进过程中,端头土体若发生失衡,易引发涌砂、涌水、地面塌陷等问题,既影响施工进度,也会对设施和周边环境造成不可逆损害,因此保障端头土体稳定尤为关键<sup>[1-3]</sup>。

端头土体加固是顶管施工的重点与难点。国内外学者基于土体力学理论开展相关研究,明确了端头加固的合理范围。但传统加固方法与理论模型易受地质条件、施工工序、现场操作等多重因素影响,难以保障其在粉土、软土、砂土及富水地层中的加固效果。另外,大断面矩形顶管端头特殊的结构与受力特征,也让现有理论面临挑战<sup>[4-7]</sup>。曹成勇等<sup>[8]</sup>基于极限平衡理论,建立了盾构进出洞端头加固土体的二维稳定性分析力学模型,并推导了端头纵向加固尺寸的计算公式;沃云舟<sup>[9]</sup>通过数值模拟,探讨了不同加固范围对端头土层稳定性的影响;刘孟波等<sup>[10]</sup>通过数值模拟,分析了加固体厚度对地层及地连墙变形的影响规律,并提出了优化建议;刘俊杰等<sup>[11]</sup>使用有限元软件,考虑洞门破除及盾构动态掘进影响,分析了盾构施工时端头加固的合理范围;张双苗等<sup>[12]</sup>通过有限元模型,分析了全方位高压喷射注浆工法加固对顶管施工的影响,结果显示,该方法可有效降低沉降和变形,但增加桩密度的加固效果有限。

目前,针对矩形顶管端头加固的模型试验研究仍不足,加固参数与沉降控制效果的定量关系及大断面顶管破洞顶进时加固范围对地表沉降和土压力的影响尚缺乏深入探究。大断面破洞面临尺寸大、覆土深、受力复杂等难题,且现场试验受限,需结合工程特点开展缩尺试验。本文依托合肥市龙岗管廊综合项目,制作了 1:20 缩尺模型,开

展模型试验模拟顶管施工,探究不同加固长度的土体形变与应力特征。通过对比各工况下地表沉降、土压力监测结果,探明了加固长度和沉降的非线性规律,并利用 Abaqus 有限元软件开展模拟验证,提出了经济适用的加固参数建议。

1 工程概况

合肥市龙岗综合管廊项目全长约 2.51 km,配套双舱综合管廊与道路同步建设,标准断面为 5.4 m×3.3 m,特殊区段最大断面达 6.6 m×3.3 m,顶管段采用 8.2 m×4.5 m 的预制管节,每节预制管节长 1.6 m。穿越南淝河段时采用特殊设计,顶管轴线与河床最小净距为 8.6 m,穿越水域长度为 188 m,矩形顶管破洞图见图 1。施工区域地质条件复杂,场地分布有软土,顶管主要穿越土层为流塑状淤泥质粉质黏土和粉土,主要参数见表 1。



图 1 矩形顶管破洞图  
Fig. 1 Picture of rectangular pipe jacking hole

2 缩尺模型试验

2.1 模型试验开发

为解决现有矩形顶管模型试验系统不能精准控制管壁注浆压力、掌子面压力和土体损失率等

表 1 土体主要参数表  
Tab. 1 Main soil parameters

| 土层      | 层厚/m  | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa |
|---------|-------|--------------------------|----------|------|----------|---------|
| 素填土     | 2.50  | 19.10                    | 0.018    | 0.30 | 10.00    | 10.00   |
| 粉质黏土    | 7.00  | 19.20                    | 0.025    | 0.30 | 12.40    | 38.30   |
| 粉土      | 15.00 | 20.10                    | 0.038    | 0.33 | 21.60    | 8.60    |
| 细砂      | 4.00  | 20.30                    | 0.100    | 0.32 | 20.00    | 25.00   |
| 全风化泥质砂岩 | 3.20  | 21.20                    | 0.500    | 0.30 | 17.00    | 32.00   |
| 强风化泥质砂岩 | 3.80  | 23.50                    | 1.000    | 0.22 | 27.00    | 95.00   |
| 中风化泥质砂岩 | 54.20 | 25.10                    | 6.370    | 0.21 | 31.00    | 300.00  |

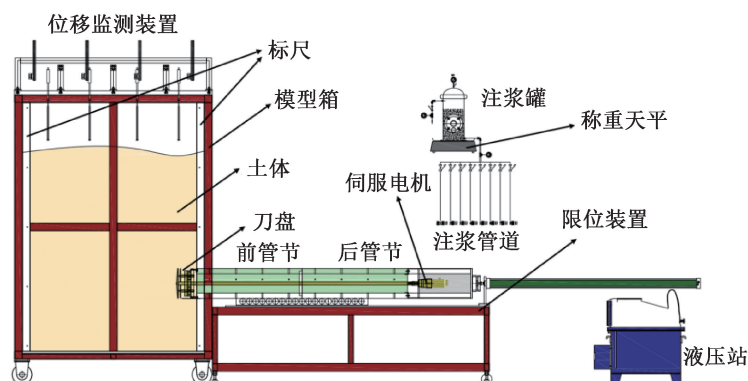


图2 矩形顶管模型试验系统设计图

Fig. 2 Design drawing of the rectangular pipe jacking model test system

问题,并研究顶管施工过程中顶力、土仓压力、顶进速度及注浆压力等因素对施工效果的影响,本文在已有系统基础上研发了矩形顶管模型的切土系统、顶管机系统、可控注浆系统、监测系统和模型试验箱体,如图2所示。

## 2.2 相似分析

本研究采用量纲分析法,确定矩形顶管顶进过程中关键物理参数之间的相似关系。为真实反映矩形顶管工作井破洞后的工作情况,结合试验场地、设备等因素,本文采用1:20的缩尺模型开展试验研究,主要物理参数相似关系如表2所示。模型物理量应满足以下关系:几何边界相似比 $C_L = n$ ;重力、土体内摩擦角、土体泊松比、土体容重、土体密度、管土界面摩擦系数相等,即 $C_g = C_\varphi = C_\mu = C_\gamma = C_\rho = C_u = 1$ ;应力、土体黏聚力相似比相等,即 $C_\sigma = C_c = 1$ ;应变、杨氏模量相似比乘积与土体黏聚力相似比相等,即 $C_\varepsilon C_E = C_c = 1$ ;压力相似比与土体黏聚力相似比相等,即 $C_p = C_c = 1$ ;顶进速度相似比 $C_v^2 = C_L^{[13]}$ 。

表2 部分关键模型物理量与原型物理量相似关系

Tab. 2 Similarity relations between model and prototype for selected key physical quantities

| 物理参数             | 相似常数                 | 相似常数关系式                        |
|------------------|----------------------|--------------------------------|
| 管节几何尺寸 $L$       | $C_L = 20$           | 管节材料尺寸                         |
| 应变 $\varepsilon$ | $C_\varepsilon = 20$ | $C_\varepsilon = C_L$          |
| 时间 $t$           | $C_t = 4.47$         | $C_t = \sqrt{C_L}$             |
| 应力 $\sigma$      | $C_\sigma = 20$      | $C_\sigma = C_\varepsilon C_E$ |
| 土体黏聚力 $c$        | $C_c = 1$            | $C_c = 1$                      |
| 杨氏模量 $E$         | $C_E = 20$           | 管节材料性质                         |
| 注浆压力 $P$         | $C_p = 20$           | $C_p = C_L$                    |
| 顶进速度 $v$         | $C_v = 4.47$         | $C_v = \sqrt{C_L}$             |

## 2.3 主要试验装置

模型试验的顶进系统主要由模型箱和矩形顶管模型构成。为真实反映实际工程开挖面土体的变形特征,模型设计需满足以下要求:(1)根据原型结构尺寸,按相似比设计矩形顶管模型的尺寸;(2)确定模型箱的结构尺寸及试验用土体的颗粒级配。设计过程需要统筹考虑模型箱、顶管模型与土体材料之间的尺寸匹配关系。

### 2.3.1 模型箱

本试验基于1:20的几何相似比,将原型尺寸为 $8.2\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ 的矩形顶管缩尺为 $410\text{ mm} \times 225\text{ mm}$ 的模型,见图3。为避免边界效应,模型箱尺寸需满足土体变形范围要求。根据工程经验,顶管横向扰动范围一般为管宽的3~4倍,故本文取5倍管宽<sup>[14]</sup>( $2\ 050\text{ mm}$ )作为模型箱宽度。覆土厚度为2~3倍管节厚度<sup>[15]</sup>,最终确定模型箱尺寸为 $2\ 500\text{ mm} \times 1\ 500\text{ mm} \times 2\ 000\text{ mm}$ 。



图3 模型箱

Fig. 3 Model test chamber

### 2.3.2 工作井、顶管机模型

为确保试验结果能准确反映实际工程的力学



行为,工作井模型尺寸设计严格遵循几何相似理论<sup>[16]</sup>。根据1:20几何相似比,对平面尺寸为16.4 m×12.0 m的原型工作井基坑进行等比例缩放,得到尺寸为820 mm×600 mm的工作井模型。综合考虑试验场地条件、设备限制及试验可行性等因素,将模型深度最终确定为1 000 mm。

根据工程实际,将顶管机模型的截面尺寸设计为41.0 cm×22.5 cm。顶管机模型由矩形机头和8个管节模型连接而成,其中,机头内嵌有切土刀盘,管节模型采用厚度为40 mm且带有注浆孔的高刚度亚克力板制成。该顶管机模型可最大程度模拟现场施工的顶进过程。

### 2.3.3 数据监测模块

数据监测模块由地表沉降和土体压力监测两部分组成,监测点位示意图见图4。试验采用非接触式激光位移传感器监测地表沉降,在模型箱表面沿顶进轴线方向按100 mm间距、垂直方向按150 mm间距布设11个网格化测点。在工作井前方20 cm处,垂直于顶进轴线方向设置横向地表位移监测断面,对应布置1号—7号激光位移传感器;沿顶进轴线方向设置纵向地表位移监测断面,对应布置8号—12号激光位移传感器,如图4(a)所示。在隧道工作井壁洞口上、下55 mm处各布设1个微型土压力盒监测土体压力,并沿垂直方向以110 mm间隔逐层向上布置多个微型土压力盒,用于监测不同深度土压力梯度及洞口区域应力分布,从下至上依次设置监测点301、302、303和304,如图4(b)所示。

### 2.4 试验方案

本研究通过模型试验,监测各加固工况下端头土体对矩形顶管始发顶进过程中地层响应的影响,重点分析地表沉降特性及工作井受力特征。

试验方案包括对照组试验和加固组试验两部分。(1)对照组试验,在未采取任何土体加固措施的情况下,对模型箱内初次填筑的原状模型土进行矩形顶管始发掘进试验,顶进速度为5 mm/min,刀盘转速为5 rad/min。随后打开空气压缩机进行注浆,注浆压力为6 kPa,同时开始实时监测顶进全过程地表横向沉降分布、顶进轴线方向的地表沉降时程曲线以及工作井侧向土压力,对照组可为加固组试验提供初始数据。(2)加固组试验,基于1:20相似比设置6种加固方案,加固长度分别为0.10、0.20、0.30、0.34、0.40、0.50 m,其中0.34 m为实际工程加固长度,加固范围示意图见图5。对照组试验完成后,重新填筑土体,按试验设定掺入石灰并夯实。每种工况加固结束后,重新填筑土体,并保持其他参数一致,矩形顶管顶进试验开始时同步采集地表沉降和侧向土压力监测数据。

### 2.5 试验步骤

矩形顶管模型试验具体操作步骤如下:(1)铺设模型土,试验土样取自工程现场顶管穿越区的原状土,土样采集与保存严格按照规范进行,以确保土体力学性质能真实反映现场工况;(2)架设工作井,将模型试验填土总高度设定为1 300 mm,为保证土体密实度均匀,填埋时分层填筑、逐层夯实,每层填土厚度严格控制在10 cm以内,填土期间同步架设工作井及内部支撑结构;(3)端头土体加固,为降低土体塑性、提升开挖面自稳能力,各加固方案均采用石灰改良端头土体;(4)布置传感器,根据监测方案在土体填筑前布设土压力盒,土体填筑至指定高度后安装激光位移传感器;(5)配制减阻浆液,减阻浆液成分为7.5%钠基膨润土、1.5%羧甲基纤维素、1.0%烧碱、0.6%水解聚丙烯酰胺及89.4%水;(6)顶管试验作业,试验设备

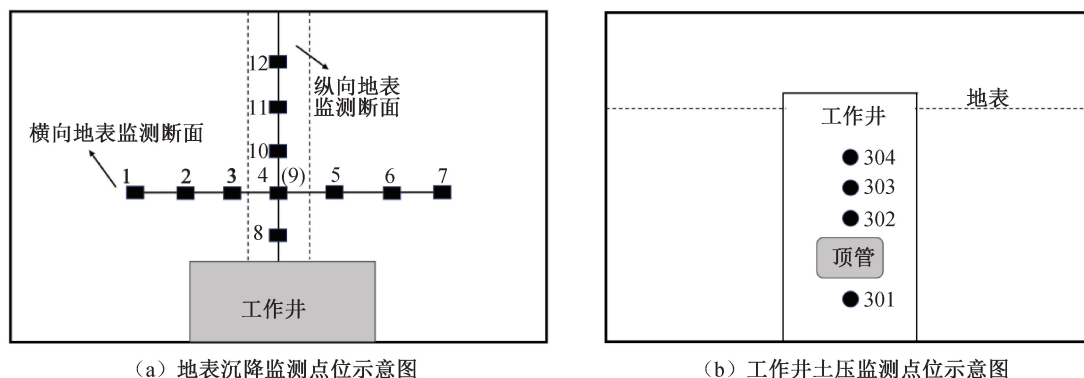


图4 监测点位示意图

Fig.4 Schematic diagrams of monitoring points



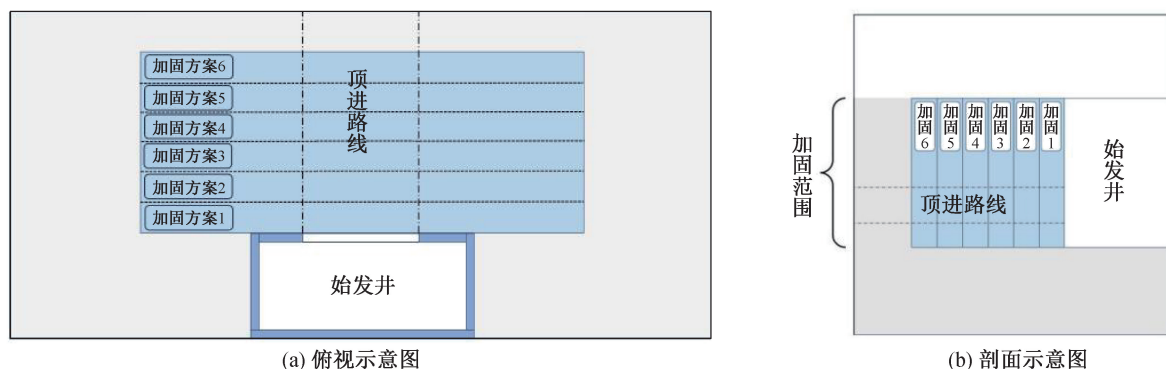


图5 加固组试验土体加固范围示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of the reinforcement range of the test soil in the reinforcement group

布设完成后,开启数据采集仪实时监测地表沉降与工作井侧向土压力,按试验方案开展顶进和同步注浆作业。

## 2.6 试验现象

在对照组试验中,通过数码相机观察到刀盘均匀地切割土体,并将其带入机头后方,由螺旋出土机排出顶管。当顶管破洞时,地表略隆起。随着顶进的继续,地表隆起逐渐转为沉降,试验过程如图6所示。

## 3 试验结果分析

### 3.1 横向地表沉降分析

观察对照组试验现象发现,顶管破洞时洞口地表略有隆起,当顶进120 mm时隆起消失,此后地表开始缓慢沉降。相较于对照组试验,各加固组试验的隆起量均有所减小。

当顶管顶进250 mm时,横向地表沉降变化趋势如图7所示。由图7可知,横向地表沉降呈典型的“V”形分布,与Peck沉降规律一致。隧道轴线处地表沉降最大,向两侧逐渐递减。当加固长度

由0.30 m增至0.34 m时,最大沉降值由3.36 mm降至3.12 mm,降幅仅为7.14%。这表明在缩尺模型试验中,即使较小加固长度也能有效控制地表沉降,但加固长度超过0.30 m后的控制效果有所减弱。

由图8可知,随着顶管顶进距离的增加,横向地表沉降值变化明显。当顶管顶进至400 mm时,横向地表沉降最大值为10.23 mm。由图8(a)可以看出,相较于未加固工况,加固后的横向地表沉降有所减小;当加固长度由0.20 m增至0.30 m时,横向地表沉降减小尤为明显,最大沉降值由6.56 mm降至5.29 mm,降幅为19.36%;当加固长度由0.30 m增至0.34 m时,最大沉降值由5.29 mm降至4.97 mm,降幅为6.05%。分析发现,0.30 m加固长度的沉降控制效果优于0.34 m。

综上分析,工作井端头土体加固可有效减小施工引起的横向地表沉降。主要是因为加固后的土体强度显著提高,能够承受顶管顶进时产生的挤压力和剪切应力,从而减小土体因应力释放导致的塑性变形;加固材料填充了土体的孔隙或裂隙,提高了土体的密实度和黏聚力,降低因土体松散引发的局部塌陷风险。在实际工程中,虽然更大



图6 试验过程

Fig. 6 Test process

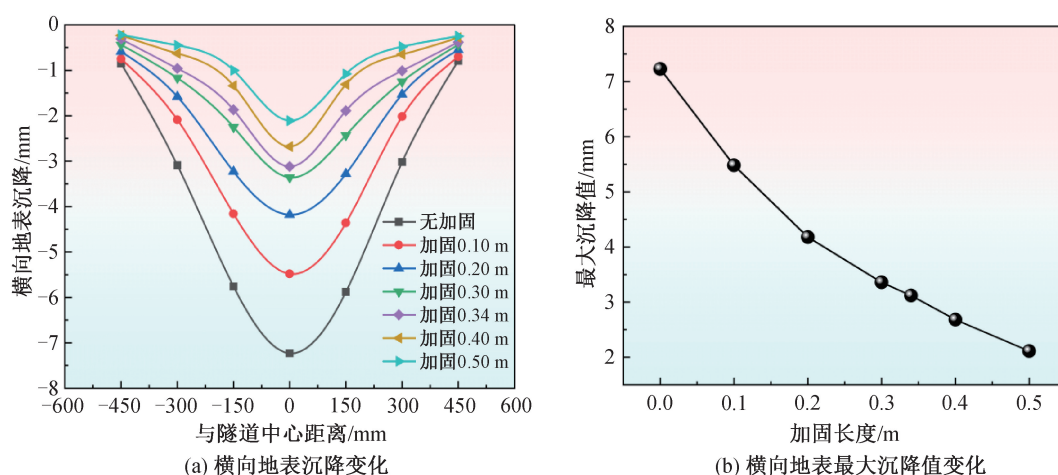


图7 顶进 250 mm 时不同加固长度下横向地表沉降

Fig. 7 Lateral ground settlement under different reinforcement lengths at 250 mm jacking distance

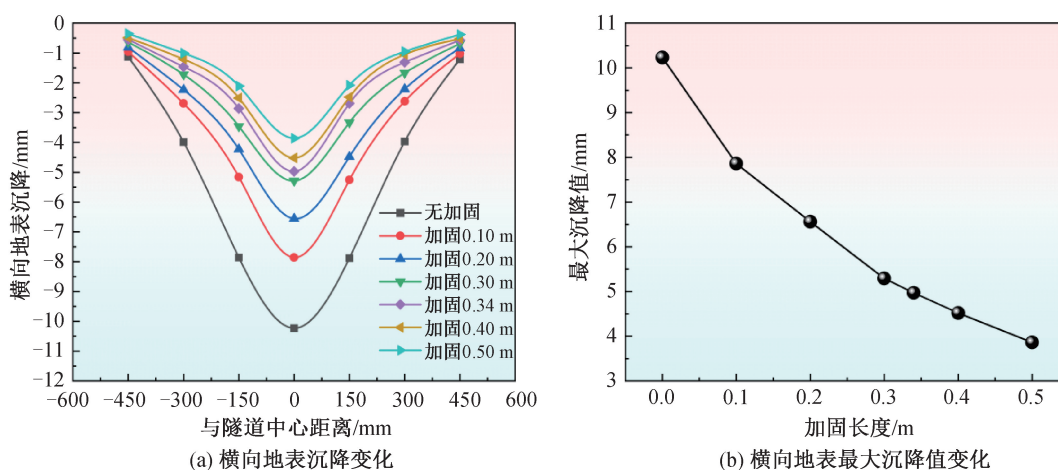


图8 顶进 400 mm 时不同加固长度下横向地表沉降

Fig. 8 Lateral ground settlement under different reinforcement lengths at 400 mm jacking distance

的加固范围可获得更好的沉降控制效果,但是当加固长度为 0.30 m (对应实际工程 6 m) 时,既能满足沉降控制要求,又更具经济性。

### 3.2 纵向地表沉降分析

由纵向地表位移试验结果(图 9)可知,顶管始发时,靠近工作井区域的纵向地表沉降最大,推测原因是机头通过监测断面前,刀盘切割扰动了掌子面前方土体,顶管周围土体向四周挤压,从而导致上方土体出现较大沉降。随着顶进距离的增加,土体可挤压的空间减小,顶管上方土体的沉降量逐渐减小。其中,顶进距离从 200 mm 增至 300 mm 时,纵向地表沉降的减小幅度最显著,此后沉降值的变化速率逐渐减小,并趋于稳定。由图 9(b)可知,当加固长度由 0.20 m 增至 0.30 m 时,纵向地表沉降值显著减小;加固长度超过 0.30 m 后,对地表沉降的控制效果逐渐减弱。

根据上述分析,工作井端头土体加固后,顶管施工轴线上方土体纵向地表沉降得到有效控制,沉降值随加固长度的增加而减小。当加固长度由 0.30 m 增至 0.34 m 时,对纵向地表沉降的控制效果开始减弱。这可能是因为加固后的土体具有更高的刚度和抗变形能力,可有效抑制施工引起的土体变形向地表扩展。实际工程中,0.30 m (对应实际工程 6 m) 是较理想且经济的加固长度。

### 3.3 工作井侧向压力分析

加固长度为 0.30 m 时工作井侧向土压力如图 10 所示。破洞时监测点 301、302、303、304 的侧向土压力分别为 69.366、503.436、241.619、386.896 kPa,其中工作井洞口上侧(监测点 302)的土压力最大,说明顶管施工过程中,洞口上侧受力集中。监测点 301 的土压力最小,说明顶管下方土体受到的

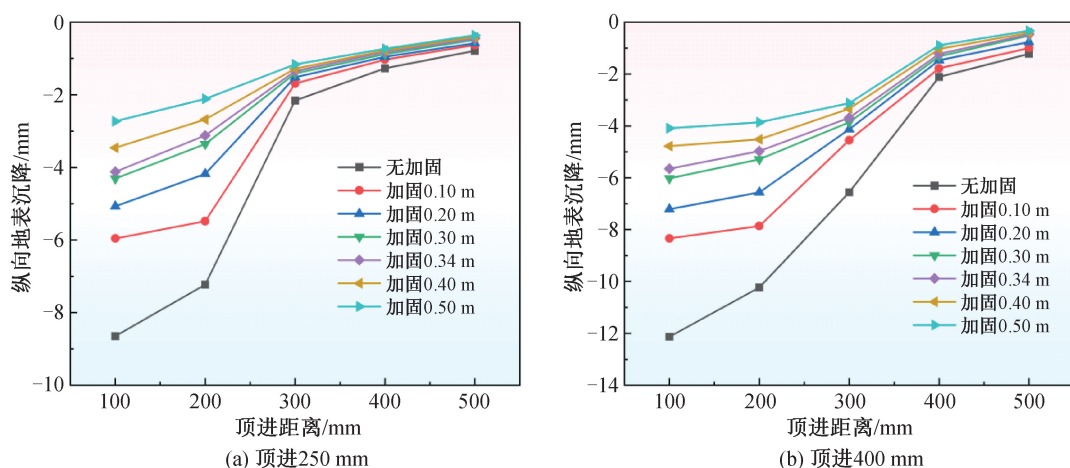


图9 顶进不同距离时纵向地表沉降变化

Fig. 9 Variation of longitudinal ground settlement at different jacking distances

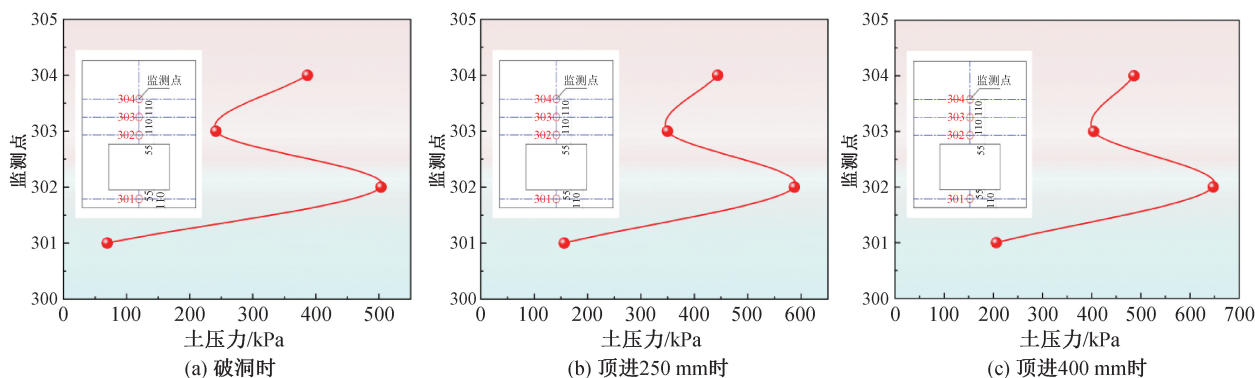


图10 不同顶进阶段井壁侧向土压力

Fig. 10 Lateral earth pressure on shaft wall at different jacking stages

扰动较小。这表明需重点加固洞口上侧,以减小局部土压力集中可能带来的风险。

如图10(b)所示,当顶管顶进至250 mm时,工作井监测点301、302、303、304的侧向土压力分别为156.423、587.436、349.783、443.645 kPa。随着顶管的持续推进,侧向土压力呈增大趋势。监测点301、302、303、304的侧向土压力较破洞时分别增加87.06、84.10、107.89、56.75 kPa,其中监测点302和303的增加值最大。造成这一现象的原因可能是矩形顶管施工使工作井前方和侧面土体发生位移和应力重分布,其中洞口区域尤为显著,顶管推进使土体向井壁集中传递,导致该区域土压力显著增大。此外,各监测点土体刚度和约束条件不同,使各测点土压力存在明显的差异。

如图10(c)所示,当顶管顶进400 mm时,工作井监测点301、302、303、304的侧向土压力分别为206.324、647.435、404.236、486.345 kPa。随着顶进距离由200 mm增至400 mm,工作井侧向土压力逐渐增大,且各测点土压力分布差异更显著。

洞口上侧的监测点302土压力最大,且明显高于其他监测点。这表明,随着顶管施工的推进,洞口上方土体受力更集中,井壁所受作用力显著增强。主要是因为顶管施工过程中,前方和侧面土体持续扰动,使土体应力重分布。特别是洞口上方土体约束效应较弱,顶管挤压导致该区域土压力快速增大。此外,监测点303、304的土压力显著增大,表明顶管施工对洞口周围区域的整体土压力影响较大。监测点301的土压力虽有所增加,但因位于洞口下侧,受到的影响相对较小。

综上所述,随着矩形顶管的顶进,工作井井壁的侧向土压力不断增大且分布不均匀,不同监测点的土压力在顶管施工过程中存在明显的变化。特别是洞口上方区域,由于顶管对土体的扰动及集中荷载效应,土压力达到最大值。以上规律揭示了施工过程中井壁侧向荷载的复杂性,在设计 and 施工过程中应重点关注洞口上方区域,采取合理的加固和支护措施,以确保施工安全和结构稳定性。



4 有限元分析

4.1 模型建立的基本假设

结合工程实际与计算需求,本研究借助 Abaqus 有限元软件模拟顶管工作井端头的加固策略。假设如下:(1)矩形顶管主要穿越粉质黏土土层,因此模拟时假设穿越土体均为粉质黏土,主要性质见表 3;(2)将土层视为连续、均质、各项同性的弹塑性体;(3)将顶管和管节视为弹塑性体;(4)不考虑地下水的影响;(5)不考虑土体固结沉降,仅研究施工引起的瞬时沉降;(6)施工过程中土体的剪切破坏遵循摩尔-库伦准则;(7)假设矩形顶管机

埋深为 15 m,顶管机外尺寸为 8.1 m×4.5 m。根据上述条件,本文构建了顶管工作井施工及破洞初期的三维数值模型,如图 11 所示。

4.2 横向地表沉降影响分析

横向沉降槽的分布可能导致邻近建筑物基础或地下管线受力不均,进而引发结构开裂或功能失效。为此,本研究采用 Abaqus 软件模拟了无加固工况及加固长度分别为 2、4、6、8、10 m 工况。横向地表监测断面位于工作井前方 2 m,且与工作井平行,因此,本文重点分析该断面的地表沉降规律。图 12(a)显示,当顶管埋深为 15 m 时,矩形顶

表 3 数值模型主要物理参数

Tab. 3 Key physical parameters of the numerical model

| 属性   | 质量密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 杨氏模量/Pa          | 摩擦角/( $^{\circ}$ ) | 膨胀角/( $^{\circ}$ ) | 屈服应力/Pa          |
|------|------------------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 初始土体 | 1 750                                    | $30 \times 10^6$ | 19.6               | 18                 | $60 \times 10^3$ |
| 加固土体 | 1 900                                    | $45 \times 10^6$ | 22.2               | 15                 | $90 \times 10^3$ |
| 顶管机头 | 6 800                                    | $45 \times 10^9$ | —                  | —                  | $35 \times 10^6$ |
| 顶管管节 | 3 500                                    | $68 \times 10^8$ | —                  | —                  | $12 \times 10^6$ |

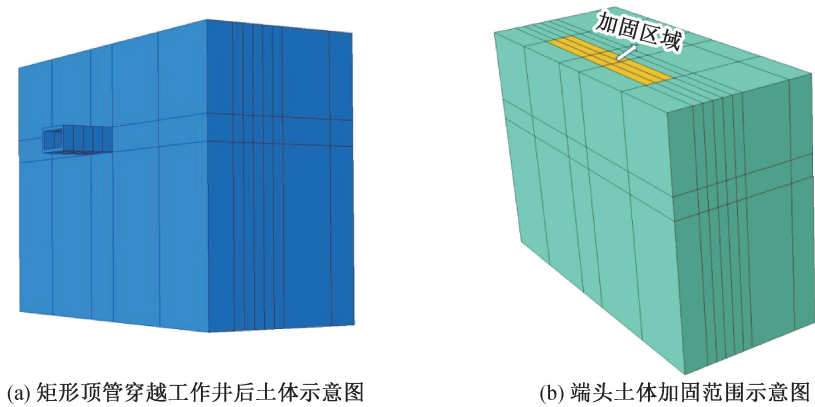


图 11 不同顶进阶段井壁侧向土压力

Fig. 11 Lateral earth pressure on shaft wall at different jacking stages

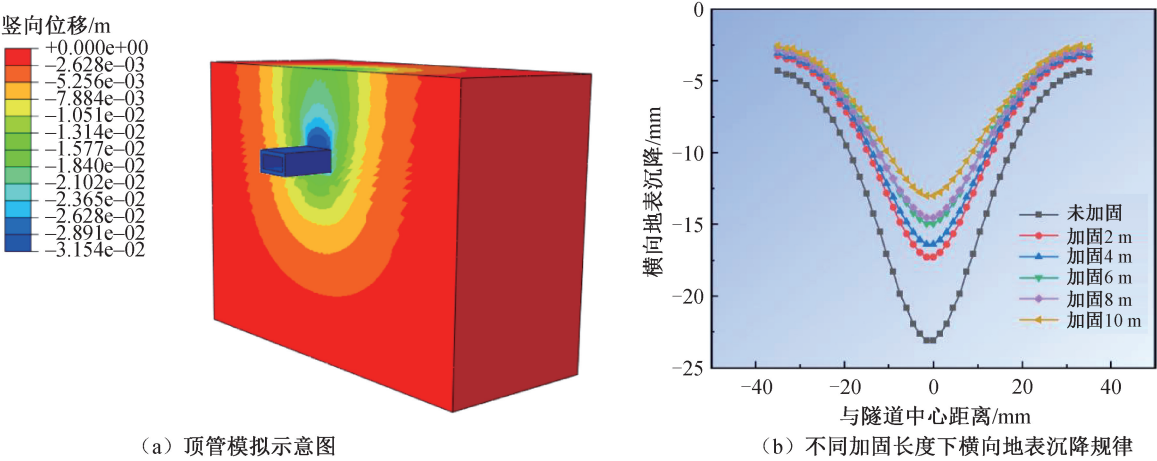


图 12 顶管模拟示意图及沉降规律

Fig. 12 Schematic diagrams of pipe jacking simulation and settlement law

管施工引起的地表沉降规律和模型试验一致,符合 Peck 沉降规律。在未加固工况下,地表轴线处沉降值最大(23.11 mm),沿轴线中心向两侧逐渐减小,呈“V”形分布。端头土体加固后,横向地表沉降有所减小。当加固长度为 2 m 时,轴线处沉降值降至 17.29 mm。随着加固长度的增加,沉降值逐渐减小,当加固长度为 4、6、8、10 m 时,沉降值分别为 16.38、13.77、13.37、13.00 mm。当加固长度由 6 m 增至 8 m 时,沉降降幅为 2.9%,低于模型试验的沉降降幅。因此,建议实际工程中端头土体加固长度取 6 m。

### 4.3 纵向地表沉降影响分析

在矩形顶管施工中,纵向地表不均匀沉降可能导致前方土体隆起,进而导致顶进阻力增大及轴线偏移。利用 Abaqus 软件模拟未加固工况和加固 6 m 工况下顶管顶进过程,分析轴线处切面的土体扰动情况,结果见图 13。可以看出,靠近顶管的土体沉降值最大,距离顶管越远,沉降值越小。顶管下方土体受到土层的约束,无法向下扩散,因而产生微小隆起;上方土体可向四周挤压,从而产生不同程度的沉降。对比图 13(a)(b)可知,当加固长度为 6 m 时,顶管施工引起的纵向地表沉降得到显著改善。

为验证不同加固长度对地表沉降的改善效果,本文采用 Abaqus 有限元分析软件分别模拟无加固及加固长度分别为 2、4、6、8、10 m 工况下的纵向地表沉降规律,结果如图 14 所示。顶管轴线处纵向地表沉降规律与模型试验基本一致,表明缩尺模型试验能反映实际的施工工况。与未加固工

况相比,端头土体加固能有效控制轴线处地表沉降,但随着加固长度的增加,控制效果逐渐减弱。当加固长度由 4 m 增至 6 m 时,沉降控制效果最明显,其次为加固长度由 8 m 增至 10 m。综合考虑施工成本与沉降控制效果,加固 10 m 虽然能进一步减小沉降,但成本会显著增加,因此加固长度为 6 m 即可满足工程需求。

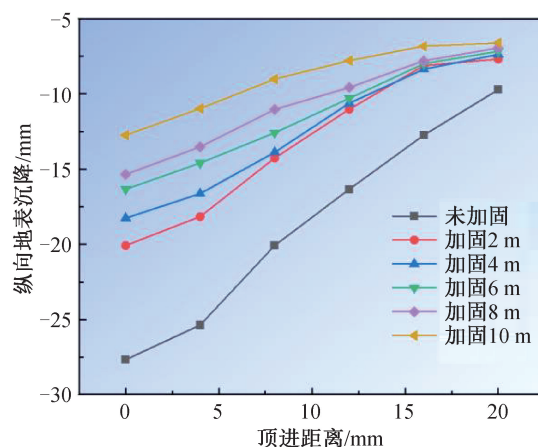


图 14 不同加固长度下顶管纵向地表沉降

Fig. 14 Longitudinal ground settlement of the pipe jacking under different reinforcement lengths

## 5 结论

针对现有端头加固效应及土体变形规律的研究的不足,本文研发了室内矩形顶管模型试验设备,依托工程实例开展模型试验,采用有限元软件进行数值模拟验证,得到以下主要结论:

1) 在矩形顶管顶进试验中,地表出现不同程度沉降,且随着顶管的推进沉降值逐渐减小。

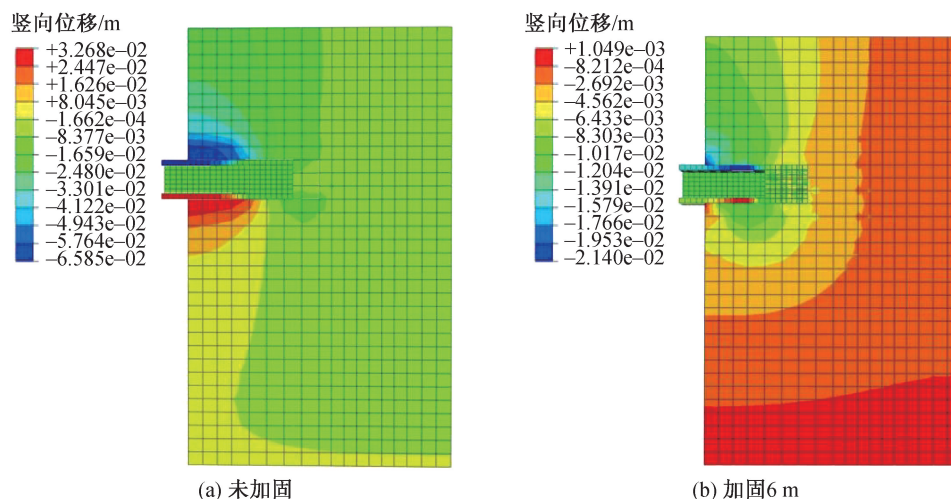


图 13 不同加固条件下顶管施工土体变形云图

Fig. 13 Contour nephograms of displacement during pipe jacking under different reinforcement conditions

端头土体加固可在一定程度上改善土体的抗变形性能,显著降低地表沉降。

2)顶管施工时,横向地表沉降呈“V”形分布,增加加固长度可有效控制沉降,但超过6 m后控制效果减弱。

3)纵向地表沉降沿顶进方向逐渐减小,工作井附近地表沉降较大,远离工作井的土体趋于稳定。顶进距离增大会增加沉降,加固措施能有效控制沉降范围。

4)顶进过程中,工作井侧壁侧向土压力逐渐增大,洞口上侧区域土压力显著高于其他位置,表现出应力集中效应。随着顶进距离的增加,侧向土压力分布差异更明显。洞口上方为受力最大区域,应重点加固以确保施工安全。

#### 参考文献:

- [1] 王非,章莘苒,韩凯杰,等.黏土地层矩形顶管施工引起的地层及结构变形响应研究[J].现代隧道技术,2024,61(S1):1018-1026.  
Wang Fei,Zhang Shenyan,Han Kaijie, et al. Study on the deformation response of ground and structure induced by rectangular pipe jacking in clayey strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(S1): 1018-1026.
- [2] 易领兵,王远六,张鹏,等.轨道交通区间盾构连续穿越高铁群桩施工响应分析[J/OL].河北工程大学学报(自然科学版),2025-09-28. <https://link.cnki.net/urlid/13.1375.N.20250928.1216.002>.  
Yi Lingbing, Wang Yuanliu, Zhang Peng, et al. Response analysis of shield tunneling for continuous crossing of high-speed railway piles in rail transit sections[J/OL]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025-09-28. <https://link.cnki.net/urlid/13.1375.N.20250928.1216.002>.
- [3] 龙炼彬,黄茂松,时振昊,等.软黏土矩形顶管土压力分布与结构响应分析[J].岩土工程学报,2024,46(S2):6-10.  
Long Lianbin, Huang Maosong, Shi Zhenhao, et al. Earth pressure distribution and structural response of rectangular pipe jacking in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S2): 6-10.
- [4] 潘羽擎,甄亮,蒋海里,等.大断面浅覆土矩形顶管模型试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(S2):125-129.  
Pan Yuqing, Zhen Liang, Jiang Haili, et al. Model tests on large-section and shallow soil rectangular pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 125-129.
- [5] 李文江,王用波,阎伟龙,等.软黏土顶管工后沉降数值模拟与模型试验[J].地下空间与工程学报,2021,17(S2):710-716.  
Li Wenjiang, Wang Yongbo, Yan Weilong, et al. Numerical simulation and model test of post construction settlement of soft clay pipe jacking[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 710-716.
- [6] 魏纲,郝威,魏新江,等.盾构隧道内竖向顶管施工室内模型试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(1):62-71.  
Wei Gang, Hao Wei, Wei Xinjiang, et al. Indoor model tests on the construction of vertical pipe jacking in shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 62-71.
- [7] 邓文杰,曹广勇,程桦,等.顶管施工模型试验系统研发与应用[J].科学技术与工程,2021,21(7):2929-2936.  
Deng Wenjie, Cao Guangyong, Cheng Hua, et al. Development and application of pipe jacking construction model test system[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2929-2936.
- [8] 曹成勇,施成华,彭立敏.盾构进出洞时端头土体纵向加固范围研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(1):119-125.  
Cao Chengyong, Shi Chenghua, Peng Limin. Study on the longitudinal soil reinforcing scope for shield tunnelling breakthrough[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 119-125.
- [9] 沃云舟.顶管始发端头土体加固方式研究与应用[D].合肥:安徽建筑大学,2022.  
Wo Yunzhou. Research and application of soil reinforcement method at the originating end of pipe jacking[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.
- [10] 刘孟波,李继超.盾构隧道端头加固技术及厚度优化数值模拟[J].建筑技术开发,2016,43(9):97-98+106.  
Liu Mengbo, Li Jichao. Numerical simulation and optimization of thickness of shield tunneling tip reinforcement[J]. Building Technology Development, 2016, 43(9): 97-98+106.
- [11] 刘俊杰,温森,孔庆梅.盾构始发端头土体加固合理范围的研究[J].河南大学学报(自然科学版),2020,50(6):733-741.  
Liu Junjie, Wen Sen, Kong Qingmei. Study on the reasonable range of soil reinforcement at the launching end of shield machine[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, 50(6): 733-741.
- [12] 张双茁,高桂庆,赖金星,等.MJS不同加固方式对降低顶管施工影响的效果分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(5):183-191.

(下转第103页)



- 刷分析研究[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 15-19.
- Quan Bingxin, Zhao Jungang, Guo Xianghong, et al. Analysis and study on scour of subgrade by river bend water[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(S2): 15-19.
- [15] 谢亚光, 余明辉, 胡鹏, 等. 弯道凹岸不同部位崩塌体对近岸水流结构影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 727-737.
- Xie Yaguang, Yu Minghui, Hu Peng, et al. Experimental study on the effects of slump block at different locations upon the flow structure near the outer bank [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 727-737.
- [16] Lai Y G, Thomas R E, Ozeren Y, et al. Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model [J]. Geomorphology, 2015, 243: 116-129.
- (责任编辑 周雪梅)
- 
- (上接第 87 页)
- Zhang Shuangzhuo, Gao Guiqing, Lai Jinxing, et al. Analysis of effect of different reinforcement methods of MJS on reducing impact of pipe jacking construction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 183-191.
- [13] 张云龙. 浅埋大断面矩形顶管顶进力计算模型研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- Zhang Yunlong. Calculation model of jacking force for shallow buried rectangular box jacking [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.
- [14] 喻军, 龚晓南. 考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- Yu Jun, Gong Xiaonan. Numerical analysis of surface settlement control considering pipe jacking construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- [15] 马险峰, 陈飞, 吴冰, 等. 顶管电缆隧道施工对邻近建筑物和地下管线的扰动影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 9074-9080.
- Ma Xianfeng, Chen Fei, Wu Bing, et al. Effect of pipe jacking cable tunnel construction on adjacent buildings and underground pipelines [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 9074-9080.
- [16] 刘群. 相似理论在装置改造上的应用[J]. 化工设计, 2004, 14(2): 46-48+2.
- Liu Qun. Application of similar theory to plant revamp [J]. Chemical Engineering Design, 2004, 14(2): 46-48+2.
- (责任编辑 周雪梅)

#### (上接第 97 页)

- Wang Zhen, Zhong Zilan, Huang Jingqi, et al. Deformation and damage evolution of critical cross section of mountain tunnels under strike-slip fault movement [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1): 425-433.
- [19] 查文华, 刘新权, 姚苏琴, 等. 露转地逆倾分步开采对含断层高陡边坡稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8403-8409.
- Zha Wenhua, Liu Xinquan, Yao Suqin, et al. Influence of step-by-step excavation from open-pit to underground with reverse tendency on stability of high and steep slopes with faults [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8403-8409.
- [20] 徐卫亚, 周家文, 邓俊晔, 等. 基于 Dijkstra 算法的边坡极限平衡有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1159-1172.
- Xu Weiya, Zhou Jiawen, Deng Junye, et al. Slope stability analysis of limit equilibrium finite element method based on the Dijkstra algorithm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1159-1172.
- [21] 李鹏, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1-17.
- Li Peng, Cai Meifeng, Guo Qifeng, et al. Research situations and development tendencies of fault slip rockburst in coal mine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1-17.
- (责任编辑 周雪梅)