

DOI: 10.11779/CJGE20231120

# 基于 DEM-FDM 耦合的平行隧道间钢套管下旋施工影响研究

徐泽宇<sup>1,2</sup>, 杨 涛<sup>1,2</sup>, 周小波<sup>1,2</sup>

(1. 中建五局第三建设有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 采用离散元-有限差分耦合数值方法研究平行隧道间钢套管下旋施工的影响。根据工程实例建立数值模型, 并通过对比模拟值与实测值验证了数值分析方法的合理性。数值模型分析了双隧道-静压、双隧道-旋压、单隧道-旋压等 3 种工况下隧道和土层的受力变形特性。结果表明: 钢套管旋压施工导致隧道产生的横向位移为静压施工的 163.5%, 单隧道工况下的隧道横、竖向变形分别较双隧道工况增加 32.7% 和 53.4%; 旋压相较于静压可以有效减小管片的收敛变形, 而单隧道工况的收敛变形为双隧道工况的 2 倍; 旋压工况下, 随钢套管沉入深度增加, 旋转指数先增加后减小, 最大值发生在套管下沉至隧道拱顶附近, 而在静压工况下需重点关注竖向旋转引起的管片错位; 对于双隧道-旋压工况, 应重点关注施工初期由于土体水平位移引起的地层变位和施工后期土体竖向位移可能导致的机械倾覆和钢套管的垂直度误差; 隧道管片应力分布区域及特征与钢套管动态施工过程紧密相关, 应在不同阶段采用相应的管片补强措施。

**关键词:** 桩基础; 隧道工程; 离散元-有限差分法; 钢套管; 受力变形

**中国分类号:** TU470      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2025)01-0207-10

**作者简介:** 徐泽宇(1995—), 男, 湖南长沙人, 博士, 主要从事软基处理及桩基础方面的研究工作。E-mail: xuzeyu159@hnu.edu.cn。

## Influences of backspin construction of steel casing between parallel tunnels based on DEM-FDM coupling method

XU Zeyu<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiaobo<sup>1,2</sup>

(1. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Fifth Engineering Bureau, Changsha 410004, China; 2. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** The coupled numerical method of the discrete element method (DEM) and finite difference method is used to study the influences of backspin construction of steel casing between parallel tunnels. A numerical model is established based on the field tests, and the numerical analysis method is verified by comparing the simulated values with the measured ones. The load-deformation characteristics of tunnels and soil layers under three working conditions, i.e., double-tunnel-static pressure, double-tunnel backspin and single tunnel backspin, are analyzed by numerical model. The results indicate that the transverse displacement caused by backspin construction of steel casing is 163.5% of that under the static pressure, and the transverse and vertical deformations under single tunnel increase by 32.7% and 53.4%, respectively, compared with those of double tunnels. Compared under the static pressure, the backspin can effectively reduce the convergence deformation of segments, and the convergence displacement under single tunnel is twice that under double tunnels. Under the backspin, the rotation index increases first and then decreases with the vertical displacement of the steel casing, and the maximum value occurs near the displacement of the casing to the tunnel arch. Under the static pressure, the dislocation of the segment caused by vertical rotation should be focused. Under the double-tunnel-backspin, the stratum displacement caused by horizontal displacement of soil at the initial stage of construction should be concerned, and the possible mechanical overturning and the vertical error of steel casing caused by vertical displacement of soil at the later stage of construction should be focused. The stress distribution area and characteristics of tunnel segment are closely related to the dynamic construction process of steel casing, and the corresponding segment reinforcing measures should be adopted at different stages.

**Key words:** pile foundation; tunnelling engineering; discrete element-finite difference method; steel casing; load-deformation

## 0 引言

为缓解日益增长的交通压力,国内许多城市已形成地下轨道交通网络。而地铁通常穿越城市建设用地紧张的核心区域,周边建筑的拆除重建或城市桥梁的桩基施工不可避免地选址于地铁隧道沿线<sup>[1-3]</sup>。钻孔灌注桩邻近地铁施工时,塌孔或缩径极易引起隧道的位移和变形,对隧道结构的稳定性产生不利影响<sup>[4-6]</sup>。而地铁隧道对变形要求极高,根据广东省标准《城市轨道交通既有结构保护监测技术标准: DBJ/T15—231—2021》,隧道的最大位移和径向收敛不超过 15 mm,椭圆度不超过 6/1000<sup>[7]</sup>。因此,选用合适的微扰动桩基施工技术,确保邻近隧道结构的安全是关键。

全套管灌注桩施工工艺已广泛应用于软土地区桩基近地铁隧道施工中,且表现出良好的适用性<sup>[8-10]</sup>。该工艺利用全套管全回转钻机,将钢套管旋压入土体,直至桩端设计标高。形成的全孔深护壁能有效地阻隔取土和浇筑混凝土时对桩周土附加应力的传递,减小地层的扰动变形。然而,现有的工程实践和研究成果表明,全套管灌注桩施工中钢套管的旋入仍会导致地铁隧道产生附加应力和变形,若变形过大将危及结构的安全<sup>[11-12]</sup>。因此,钢套管旋入施工对地铁隧道的影响亟待进一步研究。

现阶段,已有研究主要集中在现场实测<sup>[13-14]</sup>和理论分析<sup>[9, 11-12, 15]</sup>方面。实测方面,如王改等<sup>[13]</sup>监测涉地铁全套管灌注桩试桩工程施工引起的隧道水平变形和沉降位移变化,结果表明隧道的水平位移大于沉降位移,且距地铁隧道 5 m 的位置施工桩基必须采用全套管;丁智等<sup>[14]</sup>在邻近既有隧道采用全套管灌注桩施工桥桩过程中,监测土体水平位移、孔压和隧道变形,结果表明上层土体位移较大,施工对埋深较浅的道床沉降产生较大的影响。理论方面,如丁智等<sup>[9]</sup>建立简化的钢套管施工力学模型,提出考虑套管分节施工和挤土效应影响的全套管灌注桩施工附加力修正公式,基于 Mindlin 应力解公式,提出钢套管施工引起的隧道纵向变形计算公式;张霄等<sup>[11]</sup>根据桩基施工附加应力的计算结果提出考虑既有隧道刚度的附加围压计算公式,获得钢套管动态施工过程中隧道管片横向变形和力学性能。

综上,钢套管旋入施工对地铁隧道的影响研究已开始受到关注;然而,现有研究主要通过分析现场实测数据,监测点位布置较少,数据结果受外界环境影响大,人力物力成本高,尤其是不能预测施工过程存在的风险<sup>[10]</sup>。因此,国内学者开始采用数值模拟进行研究,如杨吉新等<sup>[10]</sup>利用 Midas GTS 有限元软件模拟

钢套管的压入过程,结果表明地铁结构的位移对钢套管-土界面单元中的摩擦角和黏聚力十分敏感,可采用改善钢套管和土体边界条件的方法减小套管施工的影响;林财强<sup>[16]</sup>采用数值方法对大直径灌注桩全套管成孔及取土过程进行模拟;黄大维等<sup>[17]</sup>建立有限元模型分析钢套管压入对周边土体和隧道的影响,结果表明钢套管经济合理的跟进深度为超出隧道底部约 3 m。然而,现有数值模拟研究仅考虑钢套管的下压,未考虑其旋压过程;钢套管旋转便于下部刀头破坏土体结构,且钢套管与土体发生切向相对运动能大大减小套管向下的摩擦力,利于套管的压入<sup>[12]</sup>。另外,现有研究多分析钢套管一侧为单隧道的情况,关于钢套管在平行隧道间下旋施工的影响研究鲜有报道。

基于此,本文拟通过建立三维离散元-有限差分耦合数值模型,考虑双隧道-静压、双隧道-旋压、单隧道-旋压 3 种不同工况时隧道及土层的受力变形特性,深入研究平行隧道间钢套管下旋施工的影响,以期能为全套管灌注桩施工技术的推广应用提供参考。

## 1 数值模型建立

### 1.1 工程概况

建设项目用地红线内穿越佛山地铁 3 号线(亚艺公园站—季华六路站区间 YDK49 + 180.662—YDK49 + 541.585 段),涉及区间长度约为 361 m(图 1)。地铁 3 号线隧道周边桩距离隧道的净距小于 5 m 时,采用全套管灌注桩施工工艺,共计 35 根桩,桩径为 1200 mm。本文选取#QZ745 隧道中间试桩作为研究对象,试桩与隧道的具体相对位置如图 2 所示,隧道外径为 6 m,衬砌厚度为 0.3 m,弹性模量为  $3.45 \times 10^{10}$  N/m,泊松比为 0.2;钢套管内径为 1200 mm。壁厚 3 mm,长 24.3 m,施工至③<sub>21</sub>强风化泥质粉砂岩即停止旋入;钢套管与隧道净距约为 3 m。土层参数和厚度通过勘察报告和超前钻获得,施工范围内的土层参数详见表 1。现场施工图如图 3 所示。

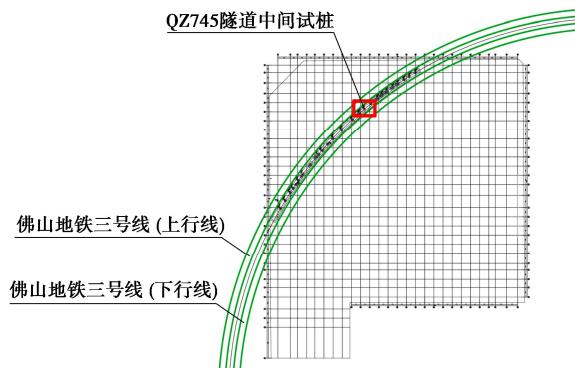


图 1 桩基与隧道位置关系图

Fig. 1 Positions of pile foundation and tunnel

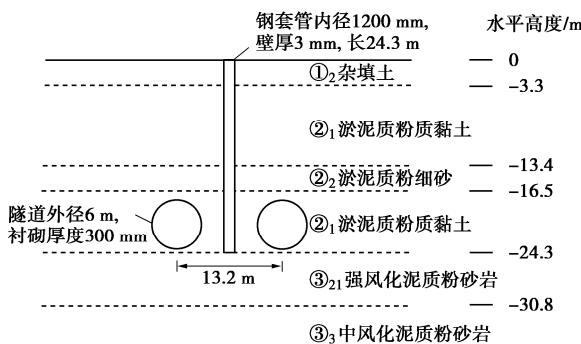


图 2 #QZ745 试桩段结构剖面图

Fig. 2 Profile of test pile section #QZ745

表 1 地基土物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical indices of foundation soils

土层	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	变形模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
①2 杂填土	18.5	3.0	13.0	10.0
②1 淤泥质粉质黏土	16.0	5.0	6.0	5.0
②2 淤泥质粉细砂	17.5	4.5	0.0	20.0
②1 淤泥质粉质黏土	16.0	5.0	6.0	5.0
③21 强风化泥质粉砂岩	19.4	100.0	35.0	30.0
③3 中风化泥质粉砂岩	20.0	120.0	40.0	35.0



图 3 #QZ745 全套管灌注桩试桩施工

Fig. 3 Construction of full casing cast-in-place pile tests (#QZ745)

## 1.2 数值模拟方法

采用离散元-有限差分 (DEM-FDM) 耦合数值方法建立平行隧道间钢套管下旋施工数值模型, 如图 4 所示。土层采用 FLAC<sup>3D</sup> 连续方法建模, 选用 Mohr-Coulomb 本构模型来表征土体的弹塑性行为; 隧道衬砌采用 shell 单元模拟; 钢套管采用 PFC<sup>3D</sup> 离散元法建模, 赋予平行黏结模型, 取较大的刚度, 保证钢套管的整体性。利用耦合墙作为连接 DEM 模型和 FDM 模型的界面, 通过 Socket I/O 接口保证两个模型之间力信息 (力和力矩) 和位移信息 (速度和位置)

的交互传递, 从而实现离散-连续耦合方案<sup>[18]</sup>, 具体可参考 Itasca<sup>[19]</sup>。

规定以钢套管顶面中心为坐标原点。在  $x$  轴方向, 模型长 79.5 m, 即隧道边缘离模型边缘距离为 30.15 m, 大于 5 倍隧道直径, 可忽略边界效应; 在  $y$  轴方向, 由于#QZ745 试桩为场界内第一根全套管灌注桩, 纵向 (即沿隧道方向) 上延伸了较长的距离 (超过 300 m) 且跨度设计相似, 为提高计算效率, 可以用 14 m 宽的切片来模拟, 在纵向方向上, 模型纵坐标  $y=-7$  m 至 7 m;  $z$  方向底部中风化泥质粉砂岩在现场延伸至较深位置, 本模型模拟了 6.7 m 厚的硬土层, 以保证模拟精度。由于数值计算结果对网格尺寸比较敏感, 因此进行了敏感性分析以得到最合适的网格划分 (图 4 (c)), 通过“犀牛”软件 griddle 中的细网格三角形单元生成数值模型。力学边界条件如图 4 (a), (b) 所示, 模型侧边 4 个面沿垂直该面的方向固定速度和位移, 模型底部的速度和位移完全固定。

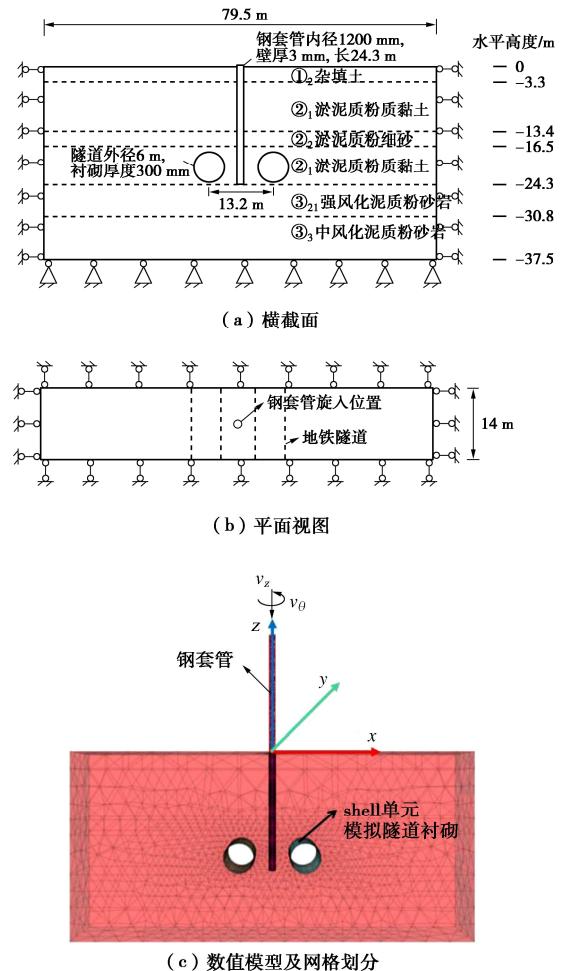


图 4 平行隧道间钢套管下旋施工数值模型

Fig. 4 Numerical model for backspin construction of steel casing between parallel tunnels

仅分析钢套管旋入的影响,因此不考虑土体初始应力场及隧道开挖作用。施工模拟具体步骤如下:①初始地应力平衡;②开挖隧道单元,激活 shell 单元,运算平衡后归零土层、隧道衬砌的速度和位移;③通过软件内置 fish 语言编写程序实现钢套管的旋转与下压,模拟钢套管下旋施工,直至达到设计深度。

### 1.3 数值模型验证

为验证耦合数值模型,将数值拟合结果与现场试桩实测结果进行对比,如表 2 所示。对比隧道管片在  $x$  轴方向和  $z$  方向的最大位移值可知,模拟值与监测值较为吻合,监测值在两个方向均较模拟值偏大,这可能是由于地铁隧道长期运营过程中,衬砌管片受到列车振动而产生的结构裂损所致。总体而言,采用本文方法可以有效模拟钢套管下旋施工对隧道的影响,在此基础上,可进一步分析钢套管单侧、双侧隧道和下压、旋入不同工况时隧道及土层的受力变形特性。

表 2 耦合数值模型验证

Table 2 Validation of coupled numerical model

监测项目	$x$ 轴方向位移/mm	$z$ 轴方向位移/mm
监测值	3.40	-1.80
模拟值	3.27	-1.74

## 2 结果与讨论

采用上述耦合数值模型进行了双隧道-静压、双隧道-旋压、单隧道-旋压 3 种工况的模拟。

### 2.1 变形分析

#### (1) 隧道变形分析

考虑模型为轴对称,仅取右侧隧道进行分析(下同)。图 5 为 3 种不同工况下隧道管片整体变形曲线随钢套管沉入深度的变化趋势,定义向上和向右变形为正,为直观地展示其变形特征,绘制曲线放大系数取  $10^3$ 。由图 5 可知,随套管下沉,隧道整体向右下方倾斜,呈现“横椭圆”型。为描述管片中各位置的变形,以隧道中心为原点,隧道右端点为  $0^\circ$ ,逆时针为正。对于双隧道-旋压工况(如图 5(b)),最大  $x$  向位移为  $3.27\text{ mm}$ ,位置在管片极坐标系  $120^\circ$  处;最大  $z$  向位移为  $-1.74\text{ mm}$ ,位置在管片  $345^\circ$  处。对于双隧道-静压工况(如图 5(a)),其最大  $x$  向位移为  $2.00\text{ mm}$ ,位置在管片  $30^\circ$  处;最大  $z$  向位移为  $-1.92\text{ mm}$ ,位置在管片  $120^\circ$  处。结果表明:旋压工况下,隧道管片的横向位移为静压工况的  $163.5\%$ ,然而竖向位移更小。这是因为旋压工况下不仅产生径向压力,且产生环向摩阻力,两者的叠加作用导致旋压工况下横向位移更大;而由于钢套管的旋转,管底土体更容易破坏,且环向摩阻力分摊了一部分竖向摩阻力,故竖向的位移较静压工况小。对于单隧道-旋压工

况(如图 5(c)),其最大  $x$  向位移为  $4.34\text{ mm}$ ,位置在管片  $75^\circ$  处;最大  $z$  向位移为  $-2.68\text{ mm}$ ,位置在管片  $90^\circ$  处。结果表明:单隧道工况较双隧道工况的整体位移更大,这是因为隧道管片刚度较土体大,平行隧道中管片之间能够起到结构支撑作用。

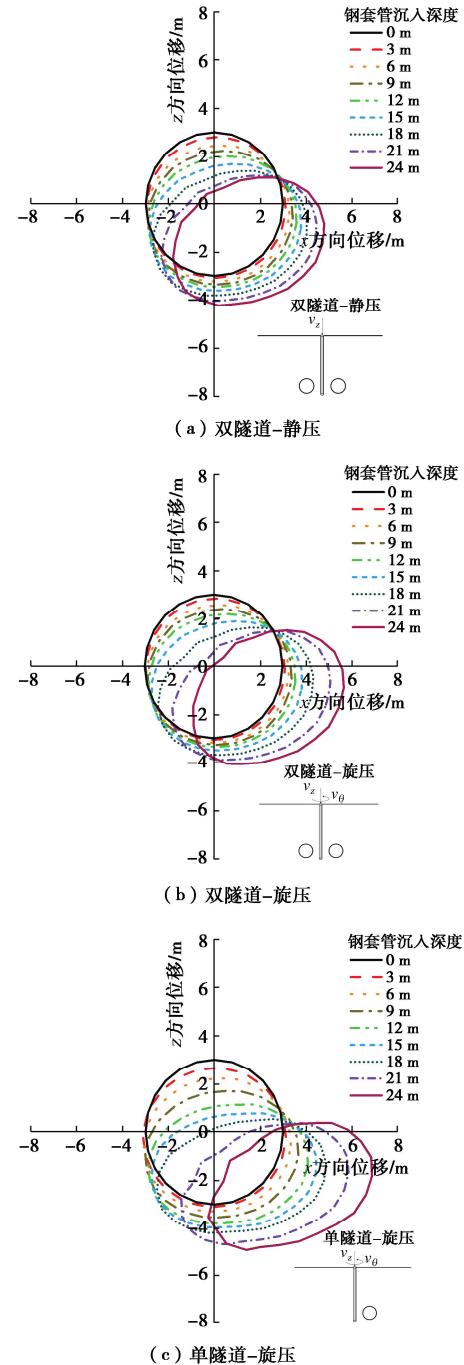


图 5 隧道管片整体变形曲线

Fig. 5 Curves of overall deformation of tunnel segment

另外,对于双隧道-旋压和单隧道-旋压工况,当钢套管沉入深度达到拱腰深度( $21\text{ m}$ )时,继续下沉将导致管片的上浮,这与徐云福等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。由于本工程钢套管旋入深度仅在隧道拱底附近,管片上浮现象不明显。监测数据表明:3 种工况下,最大

位移发生在  $x$  向, 且位置均在拱腰上方, 故在钢套管旋入施工设计中应对上半圆管片结构进行加强。

图 6 为 3 种不同工况下隧道管片收敛变形曲线, 竖向收敛定义为管片变形后拱顶与拱底之间的竖向距离和原拱径的差值; 横向收敛定义为管片变形后左、右拱腰之间的水平距离和原拱径的差值, 收敛值以外扩为正, 内敛为负。可知, 3 种工况下水平方向外扩, 竖向方向内敛, 与整体变形曲线中的“横椭圆”结论一致。随钢套管沉入深度增加, “横椭圆”逐渐发展, 直至钢套管沉入深度达到拱顶 (17~18 m) 时达到极值, 随后椭圆化逐渐缓解。对于双隧道工况而言, 对比静压施工, 旋压可以有效减小管片的收敛变形, 缓解“横椭圆”化。对于单隧道工况, 收敛变形是双隧道工况的 2 倍。另外, 当钢套管施工至隧道拱顶时, 旋压工况的管片收敛变形急剧减小, 而静压工况变化较为平稳, 这说明旋压施工钢套管时, 管片受到扰动剧烈, 需加强监测。

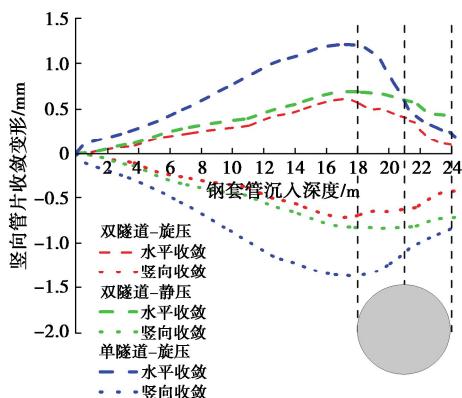


图 6 隧道管片收敛变形曲线

Fig. 6 Curves of convergence of tunnel segment

参考 Lin 等<sup>[20]</sup>提出的方法, 评估隧道的旋转变形, 如图 7 所示。

$$w = \tan \alpha = \frac{u_{x1} + u_{x2}}{D}, \quad (1)$$

$$w' = \tan \alpha' = \frac{u_{z1} + u_{z2}}{D}. \quad (2)$$

式中:  $w$ ,  $w'$  分别为横向和竖向旋转指数;  $\alpha$ ,  $\alpha'$  分别为隧道横向和竖向旋转角度,  $u_{x1}$ ,  $u_{x2}$  分别为隧道拱顶和拱底的水平位移,  $u_{z1}$ ,  $u_{z2}$  分别为隧道右侧和左侧拱腰的竖向位移,  $D$  为隧道直径。

图 8 为 3 种不同工况下隧道管片的横向和竖向旋转指数随钢套管沉入深度的变化曲线, 其中以顺时针旋转时的旋转指数为正。由图 8 可知, 隧道管片发生顺时针旋转, 且竖向旋转始终大于横向旋转。对于旋压工况, 随钢套管沉入深度增加, 旋转指数先增加后减小, 最大值发生在套管下沉深度达 16~17 m, 即隧道拱顶附近。按照上述趋势, 若钢套管继续下沉至隧

道拱底下方一定距离, 管片可能由顺时针旋转转变为逆时针旋转, 此时需考虑管片旋转方向变化引起的管片张拉<sup>[11]</sup>。双隧道工况的旋转指数始终小于单隧道工况, 这说明平行隧道结构对抵抗钢套管施工的扰动有一定优势。对于静压工况, 竖向旋转指数随钢套管下沉持续增加, 当到达隧道拱腰 (21 m) 时趋于平缓; 而横向旋转指数始终较小。故在静压工况下施工时需重点关注竖向旋转引起的管片错位。

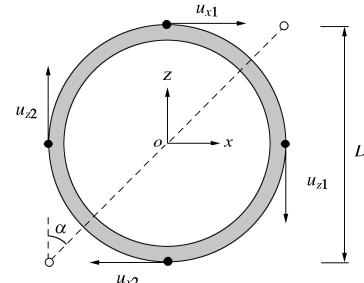


图 7 定义隧道的旋转指数<sup>[20]</sup>

Fig. 7 Definition of the rotation index

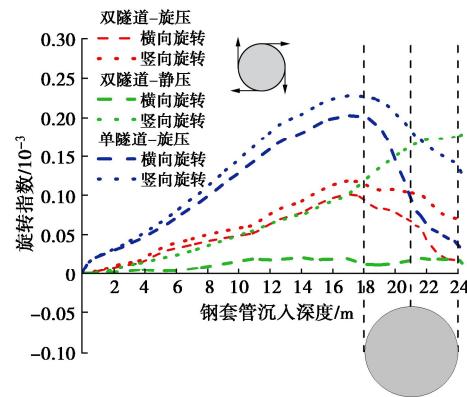


图 8 隧道管片旋转指数曲线

Fig. 8 Curves of rotation index of tunnel segment

## (2) 土体变形分析

钢套管周边土体变形曲线如图 9 所示。可知, 钢套管的压入对土体具有一定的挤土效应, 且对于旋压工况, 径向应力引起的水平位移大于垂直摩阻力引起的竖向位移; 而对于静压工况, 竖向位移与水平位移相差不大。另外, 各深度处的水平位移随套管下沉至该深度时达到最大值, 且后续随套管下沉几乎保持恒定; 而某深度处的竖向位移随套管下沉持续增加。

对于双隧道-旋压工况 (图 9 (b) ), 其最大水平位移为 48.31 mm, 发生在套管下沉 4 m 时, 位置-2 m 深度处; 其最大竖向位移为-28.67 mm, 发生在套管下沉 24 m 时, 位置-2 m 深度处。对于单隧道-旋压工况 (图 9 (a) ), 其最大水平位移为 36.47 mm, 发生在套管下沉 12 m 时, 位置-2 m 深度处; 其最大竖向位移为-34.73 mm, 发生在套管下沉 24 m 时, 位置-1 m 深度处。结果表明: 双隧道工况下, 旋压施工的水平、竖向位移分别为静压施工的 1.32 倍和 83%。同

时, 可以发现: 对于双隧道工况, 旋压和静压下的水平和竖向位移曲线形状相似, 说明各深度处的位移特征受周边结构物的影响, 与钢套管是否旋转压入无关。

对于单隧道-旋压工况(图 9(c)), 其最大水平位移为 66.10 mm, 为双隧道-旋压工况的 1.37 倍, 发生在套管下沉 12 m 时, 位置-2 m 深度处; 其最大竖向位移为-46.25 mm, 为双隧道-旋压工况的 1.61 倍, 发生在套管下沉 24 m 时, 位置-4 m 深度处。结果表明: 单隧道工况下的水平和竖向位移均远大于双隧道工况。综上, 对于平行隧道间钢套管旋压施工而言, 其水平位移最大值均发生在套管下沉较浅时的土体近地表层, 由于水平位移易引起地表土层开裂, 故应重点关注施工初期地层变位情况。施工后期, 在地层表面产生最大的竖向位移, 此时应重点关注上部施工机械的水平度, 防止机械倾覆和钢套管的垂直度误差。

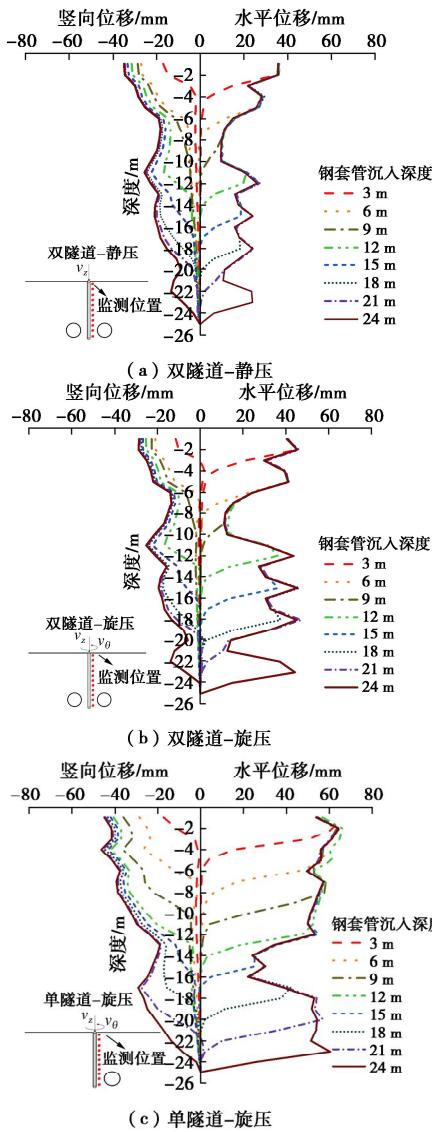


图 9 钢套管周边土体变形曲线

Fig. 9 Deformation curves of soil around steel casing

图 10 为垂直于隧道的土层剖面沉降变形曲线, 监测位置位于  $z=-18$  m 处。由图 10 可知, 随距离钢套管

中心水平距离的减小, 土体沉降逐渐增大, 至隧道右拱腰 (9.6 m) 时达到极大值点, 对于双隧道-静压、双隧道-旋压、单隧道-旋压 3 种工况下, 钢套管下沉 24 m 时的极大值分别为-2.21, -1.98, -3.42 mm; 继续靠近钢套管, 沉降变小, 且在隧道中心处 (6.6 m) 达到极小值, 3 种工况下, 钢套管下沉 24 m 时的极小值分别为-1.87, -1.50, -2.60 mm; 随钢套管距离套管中心水平距离由 6.6 m 减至 0.0 m, 钢套管下沉 24 m 时的土体沉降急剧增加, 最大值发生在邻近钢套管附近, 3 种工况下最大值分别为-13.19, -11.26, -22.16 mm。综上, 在隧道区域内, 沉降曲线存在“回拱”现象, 且隧道中心两端及隧道侧壁两端的沉降变化较为复杂, 管片受力变形复杂, 需重点关注其结构特性。另外, 双隧道-旋压工况的沉降最小, 属于结构、施工方案最优。除此之外, 钢套管沉入深度达到隧道拱顶 (18 m) 时, 套管侧土体沉降显著增大, 故需重点关注该时刻的施工质量, 加强监控。

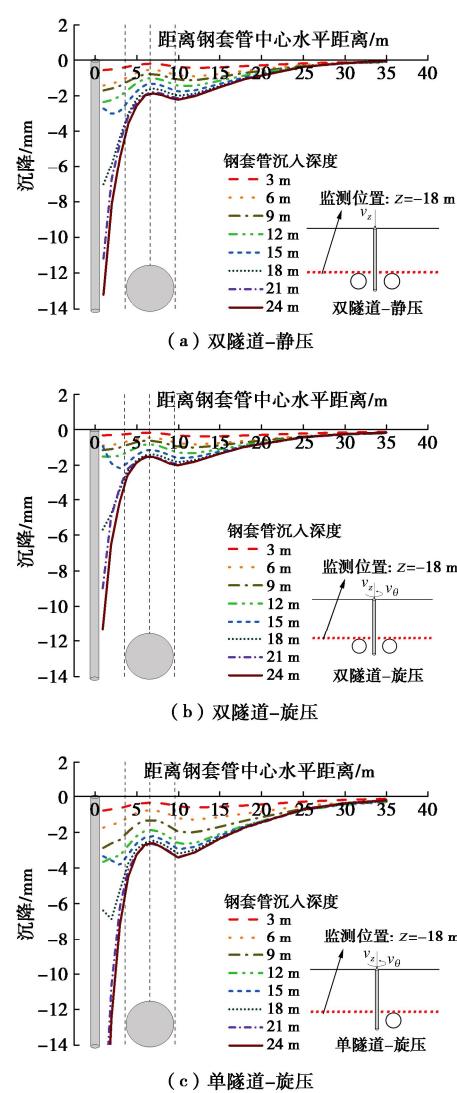


图 10 垂直于隧道的土层剖面沉降变形曲线

Fig. 10 Curves of settlement deformation of profile of soil layers perpendicular to tunnel

## 2.2 应力分析

### (1) 隧道应力分析

图11显示了3种不同工况下隧道管片横断面环向应力增量曲线图, 规定正值和负值分别为压缩和拉伸。由图11可知, 3种不同工况下隧道管片都产生不同程度的压缩。例如, 对于双隧道-旋压工况(图11(b)), 环向应力增量主要发生在管片 $120^\circ \sim 150^\circ$ ,  $180^\circ \sim 210^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 范围内, 最大增量为 $5.84 \text{ kN/m}$ , 位于管片左拱腰下方( $210^\circ$ )处。对于双隧道-静压工况(图11(a)), 环向应力增量集中在管片 $120^\circ \sim 150^\circ$ ,  $180^\circ \sim 210^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 范围内, 最大值为 $3.42 \text{ kN/m}$ , 位于管片左拱腰下方( $210^\circ$ )。双隧道工况下环向应力增量集中区域相似, 然旋压施工的增量大于静压施工, 故应重点复核上述位置管片的结构稳定性, 防止管片挤压破坏。对于单隧道-旋压工况(图11(c)), 环向应力增量集中在管片 $150^\circ \sim 165^\circ$ ,  $195^\circ \sim 225^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 范围内, 最大值为 $8.45 \text{ kN/m}$ , 位于管片左拱腰上方( $165^\circ$ )。可知, 单隧道工况下的环向应力增量集中区域较双隧道工况发生逆时针旋转, 且增量值更大, 具有较大的结构安全隐患。

3种工况下, 管片左拱腰上方的环向应力增量在钢套管下沉至 $18 \text{ m}$ (隧道拱顶)时急剧增加; 管片左拱腰下方的环向应力增量在钢套管下沉至 $24 \text{ m}$ (隧道拱底)前几乎为零, 沉至隧道拱底时突增; 管片右拱腰下方的环向应力增量随钢套管的下沉稳步增大。故实际施工过程中, 应考虑钢套管动态施工下, 3个不同发展特征的环向应力增量集中区域内管片压缩变形的监控, 或在上述区域内采取一定的管片补强措施。

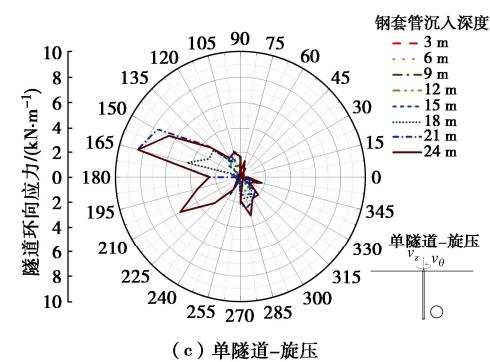
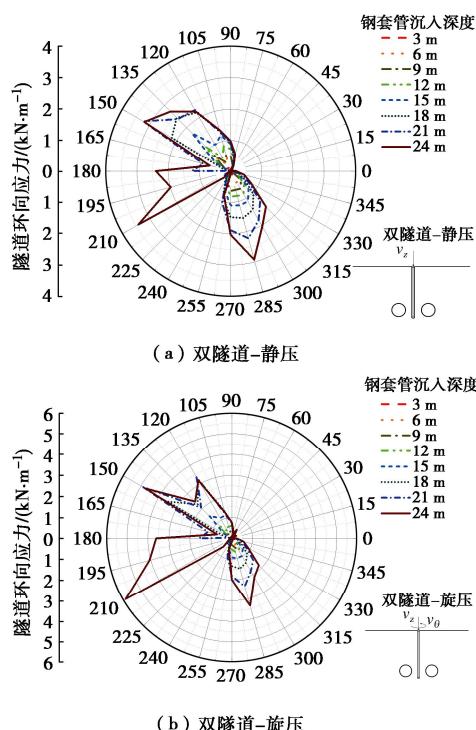
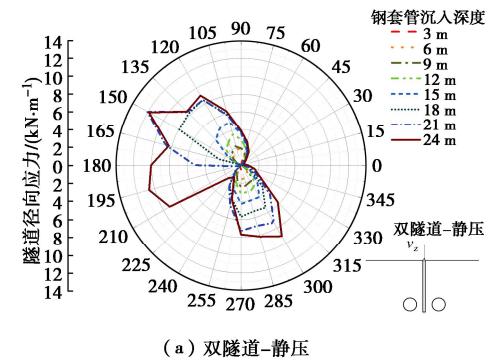


图11 隧道管片横断面环向应力增量曲线图

Fig. 11 Curves of circumferential stress increment in cross-section of tunnel segments

图12显示了3种不同工况下隧道管片横断面径向应力增量曲线图, 规定正值和负值分别为指向圆心和远离圆心。由图12可知, 3种不同工况下隧道管片都产生不同程度指向圆心的径向应力。例如, 对于双隧道-旋压工况(图12(b)), 径向应力增量集中在管片 $120^\circ \sim 210^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 范围内, 最大增量为 $19.23 \text{ kN/m}$ , 位于管片左拱腰下方( $195^\circ$ )处。对于双隧道-静压工况(图12(a)), 径向应力增量集中在管片 $105^\circ \sim 210^\circ$ 和 $255^\circ \sim 315^\circ$ 范围内, 最大增量为 $11.86 \text{ kN/m}$ , 较双隧道-旋压工况减少 $38.3\%$ , 位于管片左拱腰上方( $150^\circ$ )处。对于单隧道-旋压工况(图12(c)), 径向应力增量主要发生在管片 $150^\circ \sim 180^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 范围内, 最大增量为 $27.88 \text{ kN/m}$ , 较双隧道-旋压工况增加 $45.0\%$ , 位于管片左拱腰上方( $150^\circ$ )处。

类似的, 3种工况下径向应力增量集中区域特征与环向应力相似, 不同的是, 对于旋压工况, 当钢套管从 $21 \text{ m}$ 下沉至 $24 \text{ m}$ 时, 管片左拱腰上方的径向应力不增反减。另外, 对于双隧道-旋压工况, 尤其要注意钢套管施工至隧道拱底时, 管片左拱腰下方的径向应力突增, 易产生管片挤压开裂。值得注意的是, 本文考虑模型的轴对称关系, 仅取钢套管右侧隧道进行分析, 故对左侧隧道进行设计时, 管片上的应力分布应沿轴相反。



(a) 双隧道-静压

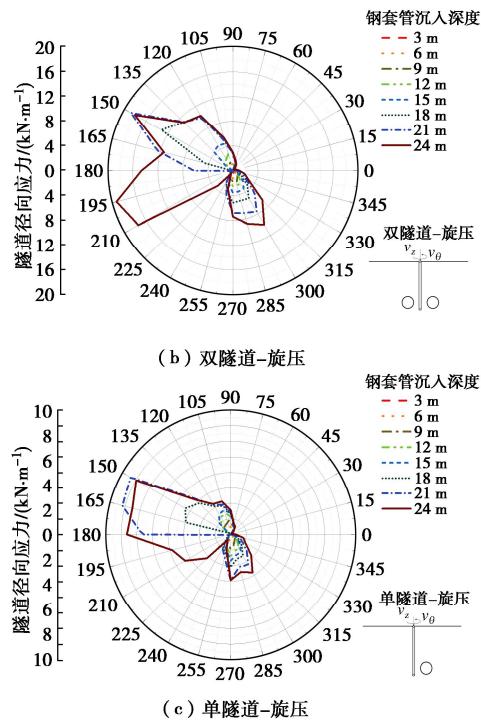


图 12 隧道管片横断面径向应力增量曲线图

Fig. 12 Curves of radial stress increment in cross-section of tunnel segments

## (2) 土体应力分析

图 13 为不同工况下套管下沉至设计标高时土体的竖向应力云图, 以  $y=0$  平面作切片分析。对于套管内土体竖向应力, 由于套管内壁摩阻力, 土体应力较原地层应力增加, 在双隧道-静压工况下尤为明显, 这是因为静压工况下, 套管相对土塞竖直下滑, 而旋压工况下, 套管相对土塞螺旋下滑<sup>[12]</sup>。双隧道-静压、双隧道-旋压、单隧道旋压工况下套管底端的最大竖向应力值分别为: 1889, 815, 2394 kPa, 双隧道-旋压工况下引起的应力集中最小。

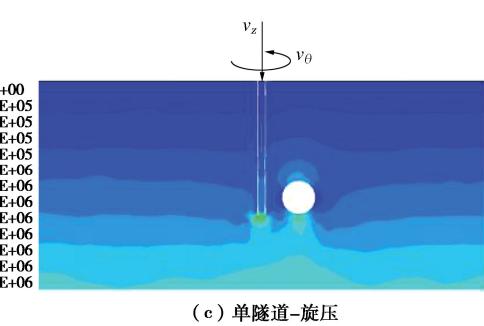
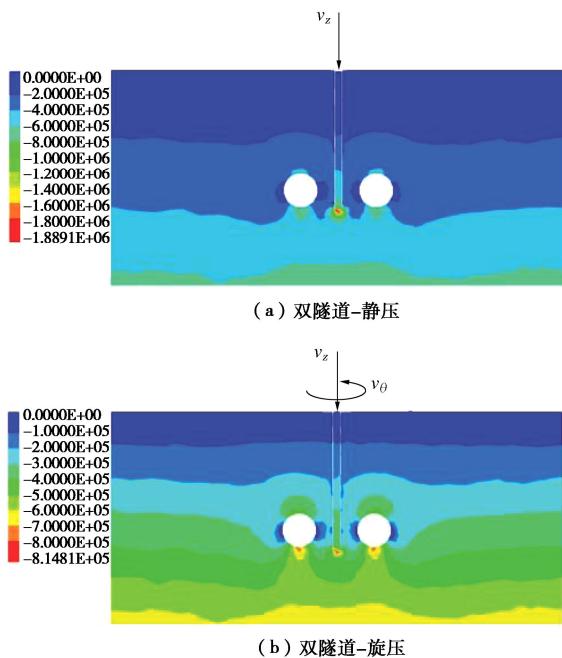


图 13 土体竖向应力云图 (单位: Pa)

Fig. 13 Clouds of vertical stress of soil mass (unit: Pa)

## 3 结 论

本文建立三维离散元-有限差分耦合数值模型, 研究双隧道-静压、双隧道-旋压、单隧道-旋压 3 种工况下钢套管下旋施工的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 钢套管旋压施工导致隧道产生的横向位移为静压施工的 163.5%, 将现有针对静压施工的成果应用于考虑旋压工况具有较大风险; 单隧道工况下, 隧道横向和竖向变形较双隧道工况增加 32.7% 和 53.4%, 针对单隧道的研究成果应用于双隧道施工工况中较保守。

(2) 旋压工况下, 单隧道的横、竖向旋转指数分别是双隧道的 2.0 倍和 1.92 倍。静压工况下的竖向旋转指数随钢套管下沉持续增加, 直至隧道拱腰处趋于收敛, 故静压工况下需重点关注竖向旋转引起的管片错位。

(3) 双隧道-旋压工况下, 在套管下沉较浅时, 套管周边土体的水平位移主要发生在近地表层, 易引起地表裂缝, 应重点监测施工初期地层变位情况。地层表面的竖向位移随套管下沉逐渐增大, 应持续监控施工机械的水平度, 防止机械倾覆和套管的垂直度误差。

(4) 隧道管片左拱腰上方、左拱腰下方、右拱腰下方 3 个不同区域内管片应力增量随套管下沉具有不同的特征, 应根据各区域特点采取专项监测方案或一定的管片补强措施。

限于篇幅, 钢套管内积土清理工序控制的研究, 笔者将于后续研究中进一步探讨。

## 参考文献:

- [1] 丁智, 张霄, 周联英, 等. 近距离桥桩与地铁隧道相互影响研究及展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(10): 1943-1953, 1979. (DING Zhi, ZHANG Xiao, ZHOU Lianying, et al. Research and prospect of interaction between close bridge pile and metro tunnel[J]. Journal of Zhejiang

- University (Engineering Science), 2018, **52**(10): 1943-1953, 1979. (in Chinese))
- [2] 蔺云宏, 李冀伟, 王飞. 暗挖地铁隧道斜交下穿既有铁路的施工研究 [J]. 铁道工程学报, 2012, **29**(11): 82-86. (LIN Yunhong, LI Jiwei, WANG Fei. Study on construction of subsurface excavated metro tunnel under-passing existing railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, **29**(11): 82-86. (in Chinese))
- [3] 李兆平, 汪挺, 项彦勇, 等. 北京地铁工程邻近桥桩施工风险评估及控制对策探讨 [J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1837-1842. (LI Zhaoping, WANG Ting, XIANG Yanyong, et al. A study on risk grade classification method and disposal measures for adjacent bridge piles in Beijing metro engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1837-1842. (in Chinese))
- [4] 左亚飞, 卢文良, 俞醒, 等. 钻孔灌注桩施工对周围土体应力扰动的试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(增刊 1): 227-231. (ZUO Yafei, LU Wenliang, YU Xing, et al. Experimental research on soil stress disturbance during punched pile construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(S1): 227-231. (in Chinese))
- [5] 徐涛, 王凯, 蒋玉龙. 桥台桩基施工对邻近地铁区间隧道的影响分析 [J]. 路基工程, 2016(2): 129-133. (XU Tao, WANG Kai, JIANG Yulong. Influence analysis of abutment pile construction on neighboring metro tunnel[J]. Subgrade Engineering, 2016(2): 129-133. (in Chinese))
- [6] 徐云福, 王立峰. 近邻桩基施工对城市地铁隧道的影响分析 [J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 2): 577-582. (XU Yunfu, WANG Lifeng. Analysis of effects on city metro tunnel due to adjacent pile foundation construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 577-582. (in Chinese))
- [7] 城市轨道交通既有结构保护监测技术标准: DBJ/T15-231-2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. (Urban Rail Transit Existing Structure Protection Monitoring Technology Standard: DBJ/T15-231-2021[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2021. (in Chinese))
- [8] 庄妍, 牟凡, 崔晓艳, 等. 全套管灌注桩在临近地铁隧道的暗桥桩基工程中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 2): 41-45. (ZHUANG Yan, MOU Fan, CUI Xiaoyan, et al. Application of Benoto pile in concealed bridge piled project near subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S2): 41-45. (in Chinese))
- [9] 丁智, 张霄, 张默爆, 等. 桥桩钢套管施工引起地铁隧道纵向变形计算研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(4): 836-848. (DING Zhi, ZHANG Xiao, ZHANG Mobao, et al. Computational research on longitudinal deformation of subway tunnels caused by steel casing construction of bridge piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(4): 836-848. (in Chinese))
- [10] 杨吉新, 王耀东, 张战彪, 等. 钢套筒压入对邻近地铁影响的有限元分析 [J]. 交通科学与工程, 2021, **37**(2): 14-19. (YANG Jixin, WANG Yaodong, ZHANG Zhanbiao, et al. Finite element analysis of the influence of steel sleeve pressing on adjacent subway[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, **37**(2): 14-19. (in Chinese))
- [11] 张霄, 丁智, 王震, 等. 桥桩钢套管施工引起隧道管片横向变形与内力研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(11): 2052-2062. (ZHANG Xiao, DING Zhi, WANG Zhen, et al. Transverse deformations and internal forces of tunnel segments caused by construction of steel casings of bridge piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(11): 2052-2062. (in Chinese))
- [12] 张超, 杨龙才, 黄大维, 等. 钢套管施工对地铁隧道影响分析及变形控制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3584-3591. (ZHANG Chao, YANG Longcai, HUANG Dawei, et al. Effect of steel casing construction on metro tunnel and deformation control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3584-3591. (in Chinese))
- [13] 王改, 王宏涛, 陈自海, 等. 全套管全回转钻桩基施工对运营地铁隧道的影响研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2018, **38**(S2): 318-323. (WANG Gai, WANG Hongtao, CHEN Zihai, et al. Research on influence of construction of pile foundation by full-sleeve rotary drilling rig on existing operation metro tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, **38**(S2): 318-323. (in Chinese))
- [14] 丁智, 何奇威, 叶星宇, 等. 桥桩施工对邻近既有地铁隧道影响实测研究 [J]. 铁道工程学报, 2018, **35**(9): 80-87. (DING Zhi, HE Qiwei, YE Xingyu, et al. Research on the influence of bridge pile construction on adjacent existing metro tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, **35**(9): 80-87. (in Chinese))
- [15] 黄大维, 周顺华, 宫全美, 等. 钢管压入土体施工挤土机制与案例分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 176-183. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, GONG

- Quanmei, et al. Analysis of squeezing mechanism for jacked-in construction of steel pipe and project case[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 176-183. (in Chinese))
- [16] 林财强. 大直径灌注桩全套管成孔施工影响分析[J]. 福建建设科技, 2023(2): 95-99, 136. (LIN Caiqiang. Analysis of influence of full casing hole forming construction of large diameter cast-in-place pile[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2023(2): 95-99, 136. (in Chinese))
- [17] 黄大维, 周顺华, 刘重庆, 等. 护壁套管钻孔灌注桩微扰动施工分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1103-1108. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, LIU Chongqing, et al. Analysis of small disturbing construction of protective jacket tube for cast-in-situ bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1103-1108. (in Chinese))
- [18] 张 玲, 徐泽宇, 赵明华, 等. 基于 DEM-FDM 耦合的筋箍碎石桩承载变形特性研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(11): 95-104. (ZHANG Ling, XU Zeyu, ZHAO Minghua, et al. Study on load-deformation characteristics of geosynthetic-encased stone column based on DEM-FDM coupling method[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(11): 95-104. (in Chinese))
- [19] Itasca Consulting Group. Fast Lagrangian Analysis of Continual in 3 Dimensions[M]. MN: Itasca Consulting Group, Minneapolis, 2018.
- [20] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 78-90.

### 第三十一届全国土工测试学术研讨会（第 1 号通知） (中国·新疆·乌鲁木齐 2025 年 7 月 25 日)

为了推动“一带一路”战略实施，促进新疆地区的岩土工程技术发展，加强国内外专家学者的交流与合作，第三十一届全国土工测试学术研讨会将于 2025 年 7 月 25 日—7 月 27 日在乌鲁木齐举行，本次会议主题为“携手共建“一带一路”，促进新疆岩土发展”。会议将汇聚国内外著名专家，进行特邀报告和主题演讲，并展示最新的土工测试设备和技术。我们诚挚邀请国内外的专家、学者和工程技术人员参与此次会议，共同探讨解决新疆及“一带一路”沿线岩土工程难题的创新技术和解决方案。

**主办单位：**中国土木工程学会土力学及岩土工程分会；中国水利学会岩土力学专业委员会。

**会议主题：**冻土地质条件勘察和基本性质测试技术；盐渍土原位测试和基本性质测试技术；风积沙基本性质测试技术；冻融环境下土工物理模型试验技术；盐胀环境下土工物理模型试验技术；地震活动区土工原位测试技术；膨胀土性质测试技术；粗粒土性质测试技术；混合土性质测试技术；土工测试新

型技术设备。

**论文征集：**欢迎就本届研讨会交流内容提交论文，论文将通过组委会审查、专家遴选推荐到《岩土工程学报》(增刊)(EI 收录)、《新疆大学学报(自然科学版)》、《水力发电》等期刊发表。论文篇幅一般在 5 页以内，格式请参考《岩土工程学报》。此外部分论文会被推荐到《应用基础与工程科学学报》(EI 收录)、《长江科学院院报》、《人民长江》和《水利水电快报》进行发表，其中《应用基础与工程科学学报》、《长江科学院院报》和《人民长江》会以专栏形式发表，《水利水电快报》会以专刊形式发表。论文征集邮箱：geotest2025@126.com。2024 年 11 月 30 日前提交论文全文，2024 年 12 月 31 日前返回论文录用通知，2025 年 2 月 31 日前返回修改后论文。

**联系方式：**地址：新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区华瑞街 777 号新疆大学(博达校区)建筑工程学院；邮编：830047；联系人：刘欢 15241828240，秦溯 15160925936，王存根 15299051092。

(会议组委会 供稿)