

# 长距离顶管下穿铁路高架桥梁桩基础的影响研究

张 锋<sup>1</sup>, 张 韬<sup>1</sup>, 蒋望涛<sup>2</sup>, 刘巧平<sup>3</sup>

- (1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054;  
2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410000;  
3. 延安大学 物理与电子信息学院, 陕西 延安 710006)

**摘要:** 为探讨长距离大直径圆形顶管下穿铁路高架桥梁桩基施工引起的影响, 以研和水厂分干线7#工作井~8#接收井顶管区间为依托, 建立顶管施工三维仿真数值模型, 分析顶管下穿铁路高架桥梁桩基础的影响规律。研究表明: 顶管掘进过程中, 地表横向长度方向上变形呈现先隆起后下沉变化趋势, 且最大沉降值达0.80 mm; 铁路高架桥梁桩基础水平变形呈现鼓肚子变形趋势, 顶管正穿越桥梁桩基阶段时, 桩基变形最快; 管节厚度对周围结构影响基本呈现负相关关系, 注浆压力对周围桥梁桩基影响与压力大小相关。

**关键词:** 长距离顶管; 桥梁桩基; 水平变形; 数值模拟; 参数分析

中图分类号: TU990

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0082-07

## Impacts of Long-distance Pipe Jacking Conveying Underpassing Pile Foundations of Railway Overpass

ZHANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, JIANG Wangtao<sup>2</sup>, LIU Qiaoping<sup>3</sup>

(1. China Railway First Group Fifth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410000, China;

3. School of Physics Electronic Information, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 710006, China)

**Abstract:** In order to explore the impacts caused by long-distance and large-diameter circular pipe jacking underpassing the railway viaduct pile foundation, a three-dimensional simulation numerical model for pipe jacking construction was established to analyze the influence patterns of pipe jacking underpassing the railway viaduct pile foundation based on the pipe jacking interval from Work Well 7# to Receiving Well 8# of the Yinan Water Plant Branch Line. The research results show that the deformation on the surface in the lateral length direction shows a trend of first rising and then sinking during the pipe jacking process, and the maximum settlement value reaches 0.80 mm; the horizontal deformation of the railway viaduct pile foundation shows a bulging deformation trend, and the pile foundation deformation is the fastest when the pipe jacking is directly passing through the bridge pile foundation; the thickness of the pipe section has a basically negative correlation with the surrounding structure, and the influence of the grouting pressure on the surrounding bridge pile foundation is related to the pressure size.

**Keywords:** long-distance pipe jacking; bridge pile foundation; horizontal deformation; numerical simulation; parameter analysis

长距离顶管技术因对地面交通与环境干扰小, 越来越多地应用于市政管线、电力隧道等穿越重要

建筑物的工程中<sup>[1-2]</sup>。然而, 当顶管工程需下穿既有铁路、高架桥梁等重要基础设施时, 其施工过程不

可避免会扰动周围土体,改变原有应力平衡,进而可能引起桥梁桩基的附加内力和变形,对铁路运营安全构成潜在威胁<sup>[3-5]</sup>。因此,深入研究长距离顶管施工对铁路高架桥桩基础的影响机理,对确保轨道交通运营安全和推动城市地下空间安全开发具有重要的理论意义与工程价值。

顶管施工引起的土体扰动机制及对邻近桩基的影响是一个复杂的土与结构相互作用问题。目前,国内外学者已对顶管施工引起的土体变形及对邻近结构的影响开展了一定研究。刘小锋<sup>[6]</sup>等以郑州地铁 12 号线联络通道为背景,建立三维仿真模型,发现顶管破洞施工对主隧道管片的环向扰动明显大于纵向,半切削环 90°位置拉应力最大;王志荣<sup>[7]</sup>等基于 ABAQUS 建立曲线顶管侧穿既有桩基模型,指出顶管与桩基间距越小扰动越强,开挖面支护力对桩基顺桥向变形影响显著;于英霞<sup>[8]</sup>等以深圳双圆顶管工程为依托,发现顶管垂直下穿管线更合理,两顶管净间距对管线沉降影响最大、管径最小,净间距达 1.5 倍管径时位移场由“V”形变为“W”形;李建业<sup>[9]</sup>等研发土压平衡矩形顶管模型试验平台,发现地表沉降呈高斯分布,显著沉降区集中在隧道中轴线两侧各 1.0H(H 为顶管高度),地层损失率越大则最大沉降量越大、沉降槽宽度越小;李飞<sup>[10]</sup>等针对深圳软硬混合地层大断面顶管,发现施工对地表与管线的影响分快速增加-缓慢增加-注浆减小-稳定四阶段,次高压管线位移最大值为地表沉降的 3 倍;王乐天<sup>[11]</sup>等以佛山深埋顶管工程为依托,验证 Peck 公式与数值模拟的可行性,指出横向地表沉降在 4 倍管径内变化明显;蒋凯<sup>[12]</sup>等针对长距离曲线顶管,提出曲率小于 0.01 时可近似直线顶进,顶推力随曲率呈“初期缓升-后期快增”规律,可线性预测顶推力与顶进距离关系;邓章铁<sup>[13]</sup>等针对武汉超深长距离曲线岩石顶管,研发反对接技术,从工作井设计、顶力估算、纠偏测量等方面突破施工瓶颈;Zhe<sup>[14]</sup>等建立了三维弹性成层半空间模型,研究了多层地层中顶管施工引起的地面变形。研究表明,地层弹性模量、隧道埋深与地层深度均显著影响沉降量,但不改变沉降曲线的正态分布特征,该理论方法通过了工程监测验证。

基于此,以研和水厂分干线顶管段 7#工作井~8#接收井区间下穿新昆玉铁路为工程背景,首先,利用理论初步计算大直径圆形顶管顶力,利用 midas GTS NX 软件建立三维数值仿真模型,分析顶管顶进过程周围土体和桥梁桩基础的变形的规律;最后,分

析管节厚度和注浆压力等 2 个参数对地表沉降和桥梁桩基的变形规律。研究成果可为大直径圆形顶管顶进过程引起周围结构变形扰动分析提供技术支撑。

## 1 工程概况

研和水厂分干线顶管段位于云南省玉溪市红塔区城区内,顶管线路总 7.894 km,平均深度为 14.3 m,沿线共布置 18 个顶管井,平均深度为 20.3 m,其中工作井 9 个,接收井 9 个。其中,在 7#工作井和 8#接收井区间垂直穿越昆玉新铁路,铁路桥梁桩基长度为 46 m,桥墩之间净距为 36 m,顶管距离桥梁桩基净距约 16 m,持力层位于砂砾卵石层,顶进长度为 90 m,采用 DN3000 钢筋混凝土管,壁厚 275 mm,属于大直径顶管,顶进区间采用 1 台刀盘式泥水平衡机械顶管施工,顶管(混凝土管)采用现场浇筑制作,顶进速度为 6~8 m/d。顶管与新昆玉铁路地质剖面关系如图 1 所示。

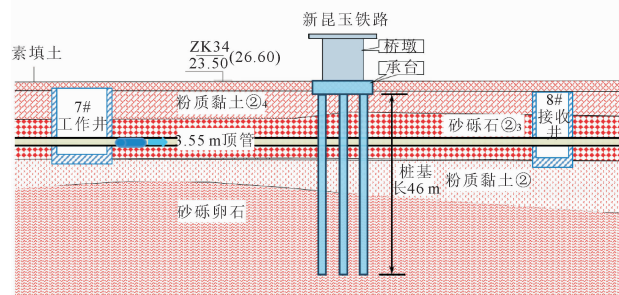


图 1 大直径顶管下穿新昆玉铁路地质剖面关系图

从图 1 可以看出,场地地层从上至下依次是素填土、粉质黏土②<sub>4</sub>、砂砾石②<sub>3</sub>、粉质黏土②和砂砾卵石层,土层物理力学参数如表 1 所示。8#接收井和 7#工作井顶管距地表约 16 m,顶管位于砂砾石层,由于砂砾石渗透性强,富水性强,顶管掘进时掌子面涌水量较大,易发生渗透破坏,导致顶管施工难度较大,可能存在卡钻等现象,同时顶进土层不均匀,易产生顶进偏差,进而影响临近新昆玉铁路安全运维。为此,该区段内大直径顶管下穿新昆玉铁路时,需严格控制地表沉降变形。

## 2 既有铁路高架桥梁桩基础影响分析

### 2.1 顶力计算

基于已有研究成果<sup>[15]</sup>,顶管顶进过程中,顶进力包括克服顶管端部阻力与顶管侧壁摩阻力两部分,该区域内顶管尺寸为圆形,对于顶管端部阻力,采用顶管端部土层土压力表示,计算表达如下:

表 1 土层物理力学参数

序号	土层	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	黏聚力 $c$ /kPa	压缩模量 $E_s$ /MPa	单位面积土的侧阻 力/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	顶进管道与周围 土层摩擦系数
1	素填土	18.0	10.0	12.0	3.0	0.1	0.1~0.2
2	粉质黏土	19.0	13.5	17.5	4.0	1.0	0.2~0.3
3	砂砾石	19.5	23.0	0	10.0	7.0	0.3~0.4
4	粉质黏土	19.5	20.5	18.5	10.0	8.0	0.2~0.3
5	砂砾卵石	19.5	30.0	0	15.0	9.0	0.3~0.4

$$P_F = \frac{\pi}{4} D^2 \gamma_s H_s \quad (1)$$

式中: $D$ 为掘进直径; $\gamma_s$ 为顶管端部所在土层重度; $H_s$ 为顶管端部所在土层厚度。

对于顶管侧部阻力,用顶管侧部摩擦阻力进行表示,计算公式如下:

$$P_f = \pi D L f_k \quad (2)$$

式中: $P_f$ 为顶管侧部阻力; $L$ 为顶管长度; $f_k$ 为顶管侧阻力。

基于此,该区段顶管采用 DN3000 钢筋混凝土管,管道掘进外径  $D$  为 3.55 m,所在土层为砂砾石,顶管长度  $L$  为 90 m,顶管侧阻力  $f_k$  取 7.0  $\text{kN}/\text{m}^2$ 。根据公式(1)、(2),计算得:顶管总顶力  $P$  为 22 700 kN,顶管最大允许顶力为 28 000 kN,顶管总顶力小

于顶管最大允许顶力,顶进施工过程管道结构安全稳定。

## 2.2 数值分析

### 2.2.1 模型建立

采用 MIDAS GTS NX 岩土工程软件模拟研和水厂分干线 7#工作井和 8#接收井区间垂直穿越新昆玉铁路施工过程,顶管长度与实际长度一致,模型尺寸是 95 m  $\times$  90 m  $\times$  80 m ( $X \times Y \times Z$ ),岩土体层物理力学参数参照表 1,采用修正摩尔-库伦本构模型(MMC)进行模拟,土层分布与实际不均匀地层一致,设置顶管管节 8 m 为一个施工工况,土体采用四面体实体单元结构形式,顶管管节用二维-壳单元,数值模型如图 2 所示。模型底部采用固定约束,侧面采用固定法向的位移约束,顶部为自由面。

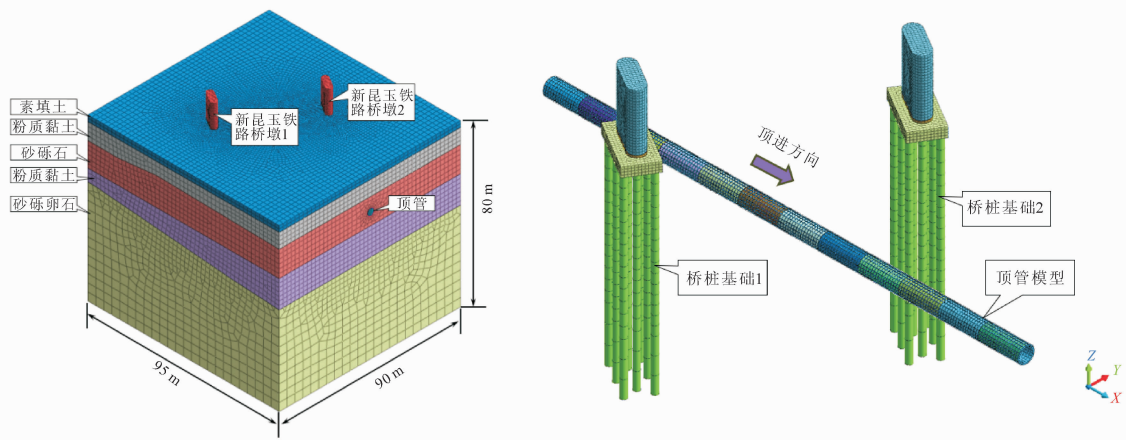


图 2 有限元数值模型

模型共划分 145 677 个单元,96 395 个节点,通过设置岩土体间强度折减系数 0.7 的界面单元模拟顶管混凝土和周围岩土体的耦合作用,且设置顶管

管节收缩率模拟实际顶管施工时的土体损失,顶管顶进过程中,顶进力按实际大小设置,顶管管节和泥水平衡机械顶管套材料参数如表 2 所示。

表 2 桩基承台及顶管隧道材料参数

名称	混凝土标号	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\mu$	尺寸/m
桩基础	C35	2500	31500	0.20	直径 1.0m, 桩长 46m
承台	C35	2500	31500	0.20	八桩承台, 长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = 11.5 $\times$ 6.0 $\times$ 2.7
顶管管节	C35	2500	31500	0.20	厚 0.275

考虑刀盘式泥水平衡机械顶管施工过程的压力情况,在模型中设置千斤顶顶力、注浆压力、掘进压力等三个部分,顶进力、注浆压力和掘进压力按照工程现场数据设置,顶管施工压力模拟如图 3 所示。

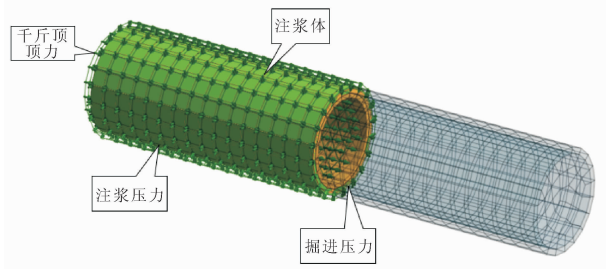


图 3 顶管施工压力模拟

为了模拟刀盘式泥水平衡机械顶管施工过程,管节长度设置为 8 m,分 12 步开挖,具体顶管施工步骤如表 3 所示。基于表 3,模拟研和水厂分干线 7 #工作井~8#接收井大直径顶管段下穿新昆玉铁路共分为 14 个施工步。

2.2.2 土层变形分析

顶管施工过程中,对地层变形影响是逐渐积累的过程,以S13工况(顶管穿越完毕)为例,其工况

下水平方向和竖直方向地层变形云图如图 4 所示。可以看出,水平和竖直方向上,顶管周围土层变形基本均呈现对称规律,水平方向上顶管左右两侧最大变形分别是 3.513 mm 和 3.491 mm,竖直方向上顶管上下两侧最大变形分别是 -4.500 mm 和 5.140 mm,竖直方向上顶管管节上方竖向沉降变形小于下方隆起变形,这是由于土层开挖导致应力释放,土体发生回弹呈现较大隆起变形。

表 3 顶管开挖步骤

施工步	工况	描述
S0	初始应力场分析	考虑整个场地初始应力,地下水设置为 -2.0 m
S1	既有铁路桥梁建成	考虑既有新昆玉铁路,模型计算后位移清零
S2	第 1 次顶管顶进	施加第 1 次顶管顶力、钝化首环顶管内土体,激活首环管片及管片前方顶管刀盘单元,首环管片壁后注浆,施加首环千斤顶顶力、注浆压力及掘进压力
S3~S13	第 2~12 次顶管顶进	同步步骤 3,依次施工顶管,直至 12 环顶管全部施工完成

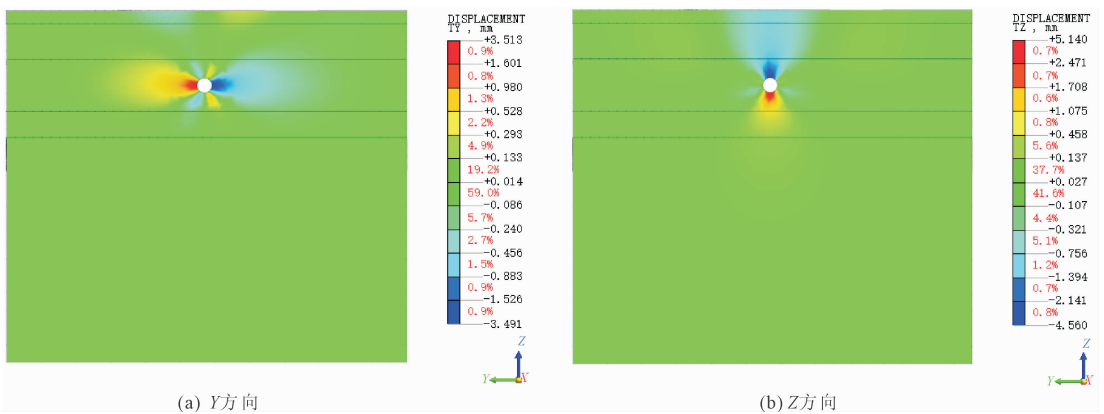


图 4 S13 工况地层变形云图

图 5 为不同工况线模型中部位置地表沉降曲线图,可以看出,随着顶管持续顶进,地表变形由隆起变形往沉降变形发展,在工况 6 之前,地表中线位置主要发生隆起变形,最大隆起位于于中线位置,在工况 6~工况 9 期间,顶管穿越模型中部位置,地表沉降显著增大,最大沉降变形达 0.8 mm,随后,顶管穿越完毕后,地表沉降由轻微回弹,这是由于采用刀盘式泥水平衡机械顶管时,顶管管节周围注浆压力施加所致。上述结果表明,顶管下穿铁路高架桥时,该区域内地表沉降影响在可控范围内,施工期间地表安全稳定。

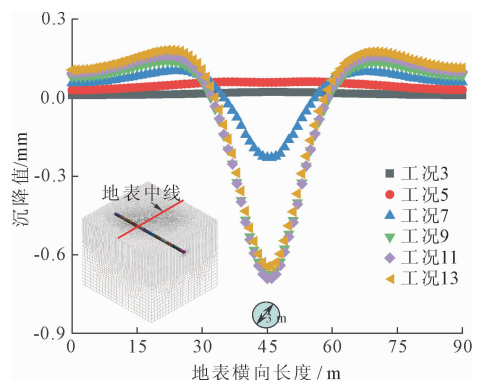


图 5 不同工况条件下地表变形曲线

### 2.2.3 桩基础变形分析

顶管施工逐渐靠近铁路高架桥,率先通过基础 1,然后通过基础 2,顶管施工对基础桩基水平方向变形影响较大,以 S8 工况(达到基础 1、2 中间)和 S13 工况(顶管施工完毕)为例,得到桥梁桩基础水平变形云图,如图 6 所示。当处于 S8 工况时,顶管通过基础 1 桩基,刚开始通过基础 2 桩基,基础 1、2 桩基最大变形分别达  $-0.392\text{ mm}$  和  $0.241\text{ mm}$ ,基

础 1 桩基变形大于基础 2 桩基变形,均朝向顶管管节外方向;当处于 S13 工况时,顶管已穿越桩基完毕,基础 1、2 桩基最大变形分别达  $-0.415\text{ mm}$  和  $0.462\text{ mm}$ ,基础 2 桩基变形稍大于基础 1 桩基变形,这是由基础 1 桩基受到顶管注浆压力影响大于基础 2 桩基所致。可以看出,顶管施工过程中,铁路高架桥桩基础变形在可控范围之内,施工期间桩基础安全稳定。

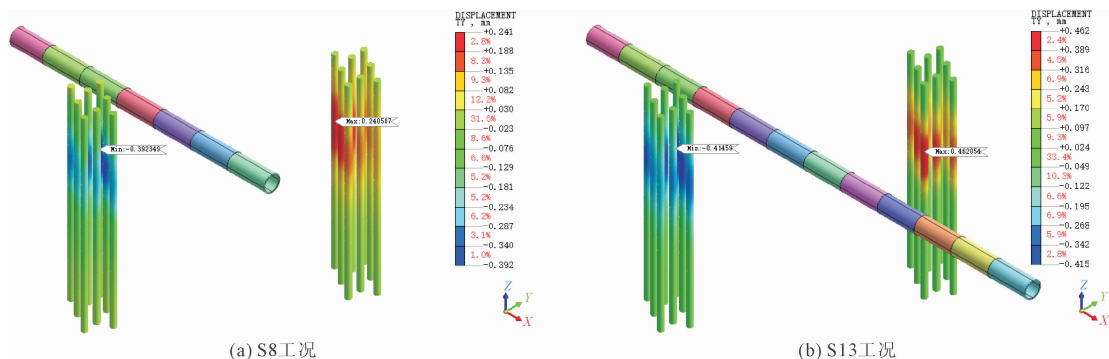


图 6 桥梁桩基水平变形云图

为了探讨桥梁桩基础随着顶管施工的变形规律,以桥梁基础 2 桩基为分析对象,桥梁基础 2 桩基水平变形曲线分析结果如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,不同施工工况下最大变形处桥梁桩基水平变形曲线几乎呈现相同变化规律,均表现为“鼓肚子”趋势,且最大水平变形均发生在顶管中心埋深位置处,随着顶管施工进行,鼓肚子越明显,意味着

桩基水平变形越大,尤其是 S6 ~ S9 工况(顶管正穿越阶段)下,桩基水平变形最大值变化最快,随后桩基水平变形最大值趋于稳定。从图 7(b)可以看出, S13 工况下不同位置处桩基水平变形曲线呈现相似规律,且近顶管位置桩基水平变形大于远顶管位置,意味着距离顶管越近桩基水平变形越大。

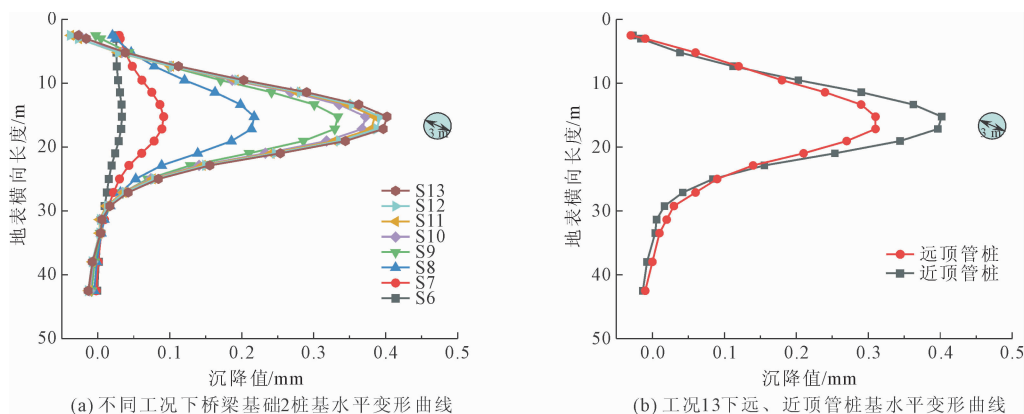


图 7 桥梁基础 2 桩基水平变形曲线分析

### 2.3 参数敏感分析

前述内容可知,顶管掘进过程中,周围土层变形与附近桩基础变形会受到影响,对于设定的顶管尺寸和桥梁结构,管节强度  $E$ 、管节厚度  $B$ 、注浆压力  $F_{\text{注}}$ 、千斤顶力  $F_{\text{顶}}$  和掘进压力  $F_{\text{掘}}$  等施工因素会影响周围结构稳定,其中管节厚度  $B$ 、注浆压力  $F_{\text{注}}$  是

施工重点调控因素。为此,对该 2 个因素进行敏感性分析。

#### 2.3.1 管节厚度

保持其他参数不变,设定顶管厚度  $B$  分别为  $0.5B_0$ 、 $0.75B_0$ 、 $1.0B_0$ 、 $1.25B_0$  和  $1.5B_0$  ( $B_0$  为初始管节厚度,  $B_0 = 0.275\text{ m}$ ),建立相应数值模型计算

求解,以此得到不同管节厚度对周围环境的影响规

律,如图 8 所示。

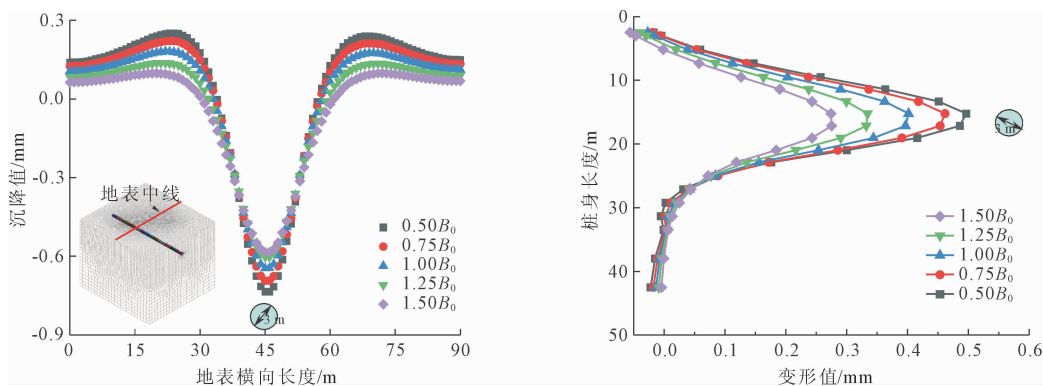


图 8 管节厚度因素下地表变形和桩基变形影响分析

从图 8(a)可以发现,随着顶管厚度  $B$  逐渐增大,地表变形均呈现中间下沉、两边隆起的状态,基本与顶管中线呈对称分布,且地表隆起和沉降最大值逐步减少,当顶管厚度分别取  $0.5B_0$ 、 $0.75B_0$ 、 $1.0B_0$ 、 $1.25B_0$  和  $1.5B_0$  时,最大隆起变形依次是  $0.25$ 、 $0.22$ 、 $0.18$ 、 $0.14$  和  $0.10$  mm,最大沉降变形依次是  $-0.74$ 、 $-0.69$ 、 $-0.65$ 、 $-0.60$  和  $-0.58$  mm;基于图 8(b),随着顶管厚度  $B$  逐渐增大,桥梁基础桩均呈现鼓肚子变形趋势,最大变形位置基本一致,当顶管厚度分别取  $0.5B_0$ 、 $0.75B_0$ 、 $1.0B_0$ 、 $1.25B_0$  和  $1.5B_0$  时,最大水平变形依次是  $0.50$ 、 $0.46$ 、 $0.40$ 、 $0.33$  和  $0.28$  mm。这说明管节厚度对周围结构影响与管节厚度基本呈负相关,这有利于在进行长距离顶管下穿铁路桥梁设计时选择合适的管节厚度。

2.3.2 注浆压力

保持其他参数不变,设定注浆压力  $F_{注}$  分别为  $0.1F_0$ 、 $0.5F_0$ 、 $1.0F_0$ 、 $2.0F_0$  和  $10.0F_0$ ,其中  $F_0$  为  $0.1$  MPa,建立相应数值模型计算求解,以此得到不同管节强度对周围环境的影响规律,如图 9 所示。

从图 9(a)可以发现,随着注浆压力  $F_{注}$  增大,地表变形均先呈现中间下沉、两边隆起的状态,随后呈现中间隆起,两边下沉的状态,基本与顶管中线呈对称分布,当注浆压力  $F_{注}$  分别取  $0.1F_0$ 、 $0.5F_0$ 、 $1.0F_0$ 、 $2.0F_0$  和  $10.0F_0$  时,最大变形值依次是  $-3.09$ 、 $-1.14$ 、 $-0.65$ 、 $0.17$  和  $0.68$  mm,这表明注浆压力过大时会导致地表变形以隆起变形为主,注浆压力过小时,地表变形以沉降变形为主;基于图 9(b),随着注浆压力  $F_{注}$  增大,桥梁基础桩均呈现鼓肚子变形趋势,最大变形位置基本一致,但鼓肚子方向发生改变,这与地表变形方向相协调,当注浆压力分别取  $0.1F_0$ 、 $0.5F_0$ 、 $1.0F_0$ 、 $2.0F_0$  和  $10.0F_0$  时,最大水平变形依次是  $2.04$ 、 $0.61$ 、 $0.40$ 、 $-0.20$  和  $-0.68$  mm。这说明注浆压力对周围结构影响与压力大小相关,注浆压力大小将直接影响周围环境结构的变形状态。

3 结 论

以研和水厂分干线 7#工作井~8#接收井顶管段区间为工程背景,进行了长距离顶管下穿铁路高架

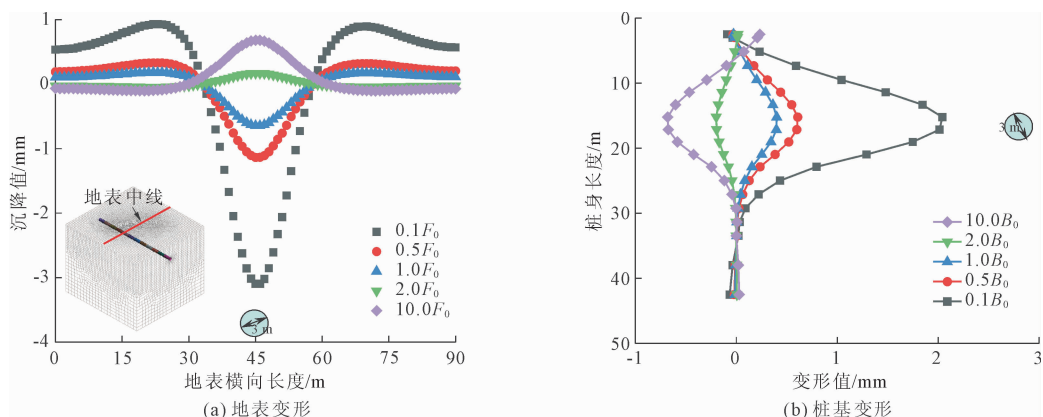


图 9 注浆压力因素下地表变形和桩基变形影响分析

桥梁桩基础的影响研究,主要结论如下:

(1) 顶管管身周围砂砾石增大顶进土层发生不均匀沉降,该区内顶力设计值为 22 700 kN,小于顶管容许顶力值,顶管施工能有效减少顶管掘进致使周围土体和高架桥梁桩基的扰动变形。

(2) 数值结果表明,顶管掘进过程中地表沉降呈现先隆起后下沉变化趋势,且最大沉降值达 0.80 mm,在顶管垂直穿越高架桥梁桩基完毕后达到最大值。

(3) 不同施工工况下最大变形处桥梁桩基水平变形曲线均表现为鼓肚子变化规律,顶管正穿越桩基过程时,桩基水平位移最大,顶管施工过程高架桥梁桩基安全稳定。

(4) 随着顶管厚度  $B$  与注浆压力  $F_{\text{注}}$  逐渐增大,地表变形均呈现中间下沉、两边隆起的状态,变形曲线与顶管中线呈对称分布,顶管厚度增大会导致地表隆起和沉降最大值逐渐减少,注浆压力过大会导致地表变形以隆起变形为主,注浆压力过小时地表变形以沉降变形为主。

#### 参考文献:

- [1] 杨富强,江 慧,施 笋,等. 浅覆土软弱地层大直径顶管技术研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(22): 55-60.
- [2] 邹 建,戚双星,杨成海,等. 某污水管网改造工程穿越不良地层顶管施工技术[J]. 人民黄河,2023,45(S1):116-117,122.
- [3] 张 波,刘晶晶. 顶管法下穿既有轨道交通隧道安全性研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(S1): 162-167.
- [4] 伍毅敏,刘延安,王 恒,等. 北京市隧道下穿施工引起城市路面沉降的影响规律回归分析[J]. 交通运输工程学报,2022,22(02):176-186.
- [5] 李永庆,杨艳敏. 大管径、长距离顶管下穿地铁隧洞的

变形控制措施[J]. 吉林水利,2020(04):1-4.

- [6] 刘小锋,李晓龙,段盛龙,等. 隧道结构对其联络通道顶管施工破洞过程的力学响应[J]. 交通运输工程学报,2025,25(04):94-108.
- [7] 王志荣,周文欢,谷 音,等. 大口径管廊顶管侧穿施工对既有桥梁桩基影响研究[J/OL]. 工业建筑,2025: 1-16 [2026-05-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2068.TU.20250428.1011.012>.
- [8] 于英霞,苗冰阳,李文杰,等. 超大直径双圆顶管施工对地下管线沉降变形影响研究[J]. 长江科学院院报,2026,43(02):130-139,147.
- [9] 李建业,许有俊,张 旭,等. 砂土地层矩形顶管施工扰动模型试验研究[J/OL]. 中国公路学报,2025:1-14 [2026-05-03]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20250715.1620.002>.
- [10] 李 飞,马彦军,吴红刚,等. 大断面顶管施工对混合地层及既有管道的影响[J]. 铁道勘察,2025,51(03):163-169.
- [11] 王乐天,宁小亮,黄鹏辉. 大直径深埋顶管施工对地表沉降的影响[J]. 地质科技通报,2022,41(06):323-330.
- [12] 蒋 凯,黄林冲,梁 禹. 长距离曲线顶管隧道施工过程中力学行为特征[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(11):2963-2970.
- [13] 邓章铁,杨圣虎,吏细歌,等. 超深长距离顶管对接施工关键技术研究与应用[J]. 中国给水排水,2023,39(02):125-132.
- [14] Geng Zhe, Jin Dalong, Yuan Dajun, et al. Study on ground deformation and settlement caused by the construction of pipe jacking tunnel in multi-layer strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2025, 165: 106856.
- [15] 周军强,凌 涛,龙明华,等. 风化地层圆形顶管下穿既有高速公路掘进隆沉变形控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(01):35-42.