

## 盾构下穿枫江地层变形特性及影响规律研究

许楚明<sup>1</sup>, 王良俊<sup>2</sup>, 邓声锐<sup>2</sup>, 马迪<sup>3\*</sup>, 卢春雨<sup>3</sup>, 陈保国<sup>3</sup>

(1. 广东省科源工程监理咨询有限公司, 广东 广州 510170; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了探讨盾构下穿河流地层变形特性及影响规律, 文章以粤东水资源优化配置工程二期工程 GX08 ~ GX09 区间盾构下穿枫江为背景, 建立盾构下穿河流有限元模型, 分析盾构下穿河流过程中地层变形特性和管片位移变化规律, 以及注浆压力和掌子面支护力对地表沉降和管片位移影响规律。研究结果表明: 盾构下穿河流前, 掘进方向掌子面上方地表竖向位移为沉降变形, 最大值 4.5 mm; 管片随着地层隆起而上浮, 注浆后管片上浮量约为 27.4 mm。下穿河流过程中, 上覆土层厚度减小, 地表竖向位移为隆起变形, 最大为 2.5 mm; 管片上浮量显著增加, 最大值为 31.7 mm。盾构掘进出河流段, 管片上浮量减小到 24.5 mm。随着注浆压力和掘进压力的增大, 盾构隧道正上方地表沉降逐渐减小, 而两侧的局部隆起量逐渐增大, 管片上浮量增加。建议下穿河流过程中掘进压力控制在 0.28 ~ 0.30 MPa, 注浆压力控制在 0.25 MPa 左右。

**关键词:** 盾构; 下穿河流; 地层变形; 管片位移; 注浆压力; 掘进压力

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)04 - 0006 - 07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.04.042

## Deformation characteristics and influencing laws of strata for shield tunneling under-crossing Fengjiang river

XU Chuming<sup>1</sup>, WANG Liangjun<sup>2</sup>, DENG Shengrui<sup>2</sup>, MA Di<sup>3\*</sup>, LU Chunyu<sup>3</sup>, CHEN Baoguo<sup>3</sup>

(1. Guangdong Keyuan Engineering Supervision Consulting Co., Ltd., Guangzhou 510170, Guangdong, China;

2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China;

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** In order to explore the deformation characteristics and influence of the stratum when the shield tunnel is crossing the river, the finite element model of the shield tunnel crossing the river is established with the shield tunnel crossing Fengjiang river in the GX08-GX09 section of the second phase of the Guangdong east water resources optimization allocation project as the background. The deformation characteristics of the stratum and the change law of the segment displacement during the shield tunnel crossing the river are analyzed, as well as the influence of grouting pressure and face support force on the surface settlement and segment displacement. The research results show that before the shield tunnel passes through the river, the vertical displacement of the surface above the face in the excavation direction is settlement deformation, with a maximum value of 4.5 mm; the segment floats up with the uplift of the stratum, and the floating amount of the segment after grouting is about 27.4 mm. During the process of crossing the river, the thickness of the overlying soil layer decreases, the vertical displacement of the surface is uplift deformation, with a maximum of 2.5 mm; the floating amount of the segment increases significantly, with a maximum value of 31.7 mm. When the shield tunnel enters and exits the river section, the

收稿日期: 2024 - 08 - 07

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(GSSC - 科研 - 2023 - 001)

作者简介: 许楚明(1985—), 男, 高级工程师, 从事水利工程施工监理工作。

通信作者: 马迪(1999—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程领域相关研究工作。

floating amount of the segment decreases to 24.5 mm. As the grouting pressure and excavation pressure increase, the surface settlement directly above the shield tunnel gradually decreases, while the local uplift on both sides gradually increases, and the floating amount of the pipe segments increases. It is recommended that the excavation pressure be controlled at 0.28–0.30 MPa and the grouting pressure be controlled at around 0.25 MPa during the process of crossing the river.

**Key words:** shield; under-crossing river; ground deformation; segment displacement; grouting pressure; tunneling pressure

实际工程中经常遇到盾构隧道下穿河流的情况,且由于上覆土层厚度变化,盾构下穿河流施工很可能造成地表隆起和管片上浮变形,存在较大施工风险。因此,开展盾构下穿河流过程中地层变形和管片位移变化规律研究,确保盾构下穿施工安全具有重要的意义。

国内外学者针对盾构隧道下穿河流相关问题开展了诸多研究工作。高永涛等<sup>[1]</sup>以苏州地铁盾构区间下穿外城河为实际背景进行数值模拟,结合现场监测数据,研究了盾构下穿河道施工地表位移及管片变形规律。杨志勇等<sup>[2]</sup>建立了管片上浮的力学模型,分析了北京地铁某盾构区间管片异常上浮的原因,通过改进浆液性能有效控制了管片上浮量。叶俊能等<sup>[3]</sup>针对深圳地铁和宁波地铁两种不同结构形式的管片,建立考虑管片错台和张开变形的施工期管片上浮数值模型,研究了管片施工期接头变形模式。叶飞等<sup>[4]</sup>推导了盾构隧道管片上浮最小覆土厚度与最大注浆压力的计算公式,分析了管片上浮机理,提出注浆压力产生的上浮力是管片产生上浮的主要原因。刘先亮<sup>[5]</sup>以宁波地铁盾构区间下穿河流为工程背景,通过 Midas 建立三维有限元模型,分析了注浆压力、盾构掘进压力施工参数对地表位移和管片上浮的影响,对地表变形和管片上浮量计算结果进行比较,得出了较为合理的施工参数。李自力等<sup>[6]</sup>以常州地铁 2 号线区间下穿京杭运河为背景,建立三维数值模型,研究了注浆量和注浆压力对地表竖向位移、隧道结构位移、及挡土墙受力和变形的影响。陈孝琼<sup>[7]</sup>依托某城市轨道交通隧道区间下穿河流工程,通过建立三维有限元模型,分析了掌子面支护力、浆液类型、注浆压力的变化对地层变形的影响。CHEN 等<sup>[8]</sup>以某盾构隧道区间下穿河堤为项目背景,研究了掌子面支护压力、体积损失、盾尾

注浆压力等参数的影响,对隧道开挖施工引起的河堤最终沉降进行了预测。FANG 等<sup>[9]</sup>以兰州地铁某盾构区间穿越强透水层为背景,开展了几何相似比为 1:10 的室内模型试验,研究了土压力、土体侧压力系数、水压力及管片的拼装方式对管片受力的影响。HUANG 等<sup>[10]</sup>以洛阳地铁 2 号线下穿洛河工程为背景,通过 Abaqus 软件建立三维数值模型,分析了盾构施工造成的累积最大地表沉降,并与实测结果进行了对比分析。梁孝等<sup>[11]</sup>以杭州地铁 5 号线盾构下穿河流工程为背景,通过数值模拟进行隧道安全施工风险评价。XIE 等<sup>[12]</sup>依托南京河跨江盾构隧道工程,采用有限元软件建立三维数值模型,研究了盾构下穿施工过程路堤沉降,分析了注浆压力变化对路堤沉降的影响。

上述研究工作从不同方面揭示了盾构下穿河流时的变形特性,在一定程度上解决了盾构下穿河流的技术难题,但是研究结果尚存在较大差异。本文以粤东水资源优化配置工程二期工程 GX08 ~ GX09 区间盾构下穿枫江为依托,通过建立盾构下穿河流三维有限元模型,研究盾构掘进施工过程中地表变形特性和管片竖向位移规律,探讨盾构施工参数注浆压力及掘进压力对地层变形和管片竖向位移的影响规律,以期可为盾构下穿枫江施工安全控制提供依据。

## 1 工程概况与重难点问题分析

### 1.1 工程概况

粤东水资源优化配置工程二期工程于 GX08 ~ GX09 区间下穿枫江。盾构下穿河道前,上覆土厚度约为 18.3 m,河水最大深度约为 6.1 m,下穿过程中盾构隧道拱顶距河底竖向净距约为 12.2 m。穿越段现状河道宽度约为 153.2 m。下穿段上覆土层为淤泥质土、含泥质中粗砂,盾构穿越地层主

要为含泥质中粗砂，下部地层为中粗砂。下穿枫江段地下水主要为孔隙潜水和承压水。盾构区间下穿枫江河道工程概况如图 1 所示。

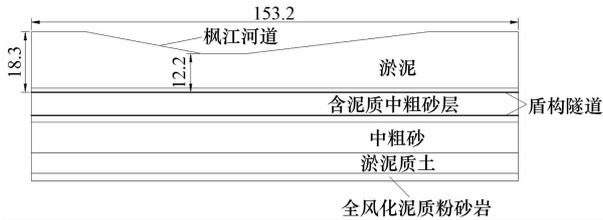


图 1 盾构隧道下穿枫江河道概况

衬砌结构为 35 cm 厚 C55 钢筋混凝土管片和 45 cm 厚 C35 钢筋混凝土内衬，管片环宽度为 1.5 m，外径为 6.7 m，内径为 5.1 m。

### 1.2 重难点问题分析

盾构下穿河流全过程，管片上覆土层厚度变化大，穿越河流时上覆土层薄，掘进压力和注浆压力难以控制，掘进过程中地层变形和管片位移控制难度大。如果施工控制不当，易产生掌子面砂土喷涌、地表沉降，管片上浮、地表隆起，管片渗漏水 and 注浆浆液击穿上覆土层，造成河床冲刷带走上覆土体而引起管片上浮等问题。此外，盾构机在推出河堤前后隧道上覆土厚度突变，如不及时调整盾构泥水压力，将导致盾构姿态的突变，使得河堤产生沉降和位移，对河堤产生危害。因此，确保盾构快速、安全地通过河流区域将是重难点问题。

## 2 有限元数值模拟分析

### 2.1 模型建立

采用 Midas GTS NX 软件建立盾构下穿枫江三维有限元模型，如图 2、3 所示。模型 X 方向上取 70 m，盾构掘进方向(Y 方向)取 153 m，高度方向(Z 方向)取 43.3 m。在模型四周施加法向位移约束，模型底部施加固定约束。

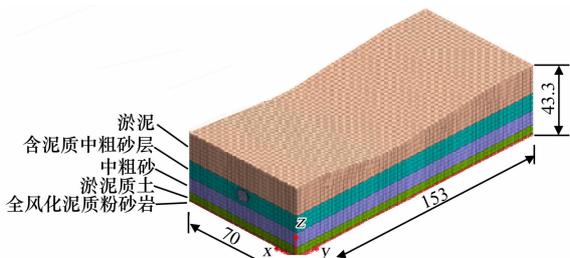


图 2 三维有限元模型

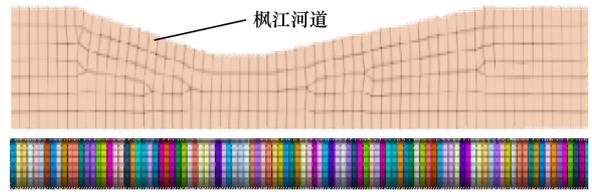


图 3 盾构下穿枫江河道模型

### 2.2 物理力学参数

土层采用摩尔-库仑本构模型，按 3D 实体单元建模，取  $E = 3E_s$ 。其中， $E$  为弹性模量，MPa； $E_s$  为压缩模量，MPa。土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土性参数

土层名称	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )
淤泥	15.1	5.6	7	10
泥质中粗砂层	18.0	18.0	0	24
中粗砂	19.5	21.6	0	30
淤泥质土	15.1	6.6	7	10
全风化泥质粉砂岩	19.6	200.0	15	29

(1) 盾壳材料为钢材，按板单元建模。

(2) 管片的材料为 C55 混凝土，采用板单元建模。

(3) 注浆层厚度为 14 cm，按 3D 实体单元建模；注浆体在初期时呈现出流动状态，随着盾构时间推移逐渐硬化，通过改变注浆层属性分别模拟流动浆液与浆液硬化状态。

管片、盾壳、浆液均按线弹性本构模型考虑。管片、盾壳、注浆体材料参数如表 2 所示。

表 2 结构参数

名称	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比
管片	25	$3.55 \times 10^4$	0.20
盾壳	78	$2.1 \times 10^5$	0.20
初期注浆体	18	5	0.25
硬化注浆体	22	40	0.20

### 2.3 相关荷载取值

(1) 掘进压力按梯形荷载分布形式，土压力按静止土压力计算。非河流段隧道掌子面上部泥水压力为 271 kPa，掌子面下部泥水压力为 382 kPa。河流段隧道掌子面上部泥水压力为 250 kPa，掌子面下部泥水压力为 361 kPa。

(2) 注浆压力取为上覆水土压力的 1.15 倍。

(3) 河道河床表面施加水压力, 如图 4 所示。

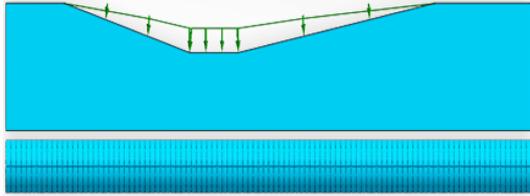


图 4 河道水压力

## 2.4 盾构开挖模拟

(1) 计算初始应力场。

(2) 施加河道水压力。

(3) 位移初始化: 进行位移清零。

(4) 盾构开挖施工: 钝化开挖土体 1、施加第一环盾壳、施加下一步开挖区的掌子面支护力, 开挖下一环钝化上一环的掌子面支护力。

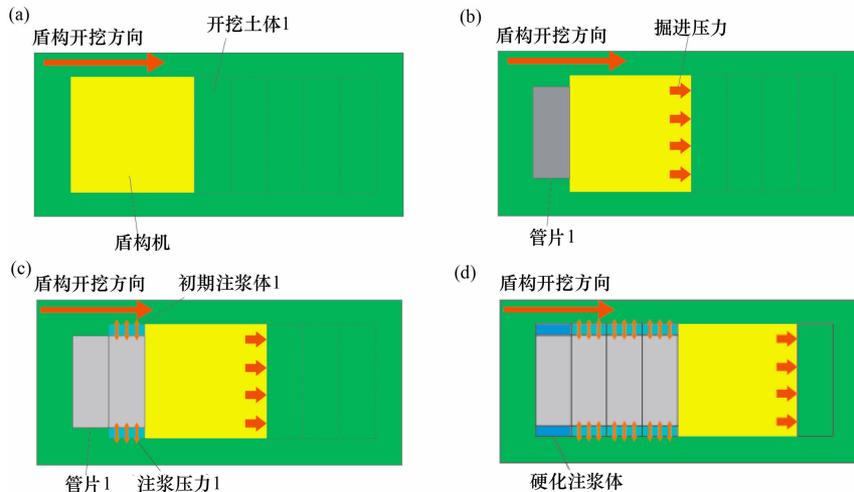
(5) 管片拼装: 钝化第一环盾壳, 激活管片 1, 开挖下一步时进行上一步的管片拼装。

(6) 同步注浆: 激活初期注浆体 1、同时激活边界组土 - 流动浆液以模拟初期注浆体属性、激活注浆压力 1、同时考虑注浆压力对地层和管片的影响。

(7) 注浆体硬化: 开挖至第 4 环时, 钝化第一环流动浆液属性, 激活第一环的硬化浆液属性, 模拟第一环的浆液硬化; 并依次循环模拟浆液硬化。

(8) 重复以上步骤, 使盾构不断向前推进, 开挖过程中, 保持距开挖面 4.5 m 的 3 环管片处于浆液流动状态, 一共进行 108 个施工阶段 (S1 ~ S108), 直至隧道开挖贯通, 所有部件均组装模拟完毕。

盾构开挖模拟步骤如图 5 所示。



(a) 初始应力场; (b) 开挖土体; (c) 激活管片、初期注浆体; (d) 注浆层硬化

图 5 盾构开挖模拟步骤

## 2.5 计算结果分析

### 2.5.1 地表竖向位移

盾构掘进方向 0 ~ 153 m, 每 20 m 取一个点, 地表竖向位移分布规律如图 6 所示。随着盾构向前掘进, 下穿河流之前(阶段①), 沿着盾构掘进方向掌子面中心上方地表竖向位移为沉降变形, 最大值为 4.5 mm; 下穿河流过程中(阶段②), 随着上覆土层厚度减小, 地表竖向位移为隆起变形, 最大隆起量约为 2.5 mm。

### 2.5.2 管片竖向位移

盾构掘进方向上管片竖向位移分布如图 7 所示。盾构下穿河流前(阶段①), 开挖过程中管片随着地层隆起而上浮, 注浆后管片上浮量约为 27.4 mm; 盾构下穿河流段(阶段②), 随着上覆土层厚度减小, 管片上浮量显著增加, 最大值为 31.6 mm; 盾构掘进出河流段(阶段③), 上覆土层厚度变大, 管片上浮量再次减小到 24.5 mm。

## 3 施工参数对地层变形和管片竖向位移影响

### 3.1 注浆压力对地层变形影响

取两个典型断面(即下穿河流之前  $Y = 10$  m, 下穿河床中心  $Y = 53.5$  m) 分析注浆压力对地层变形的影响规律。

$Y = 10$  m 断面(非河流段)地表横向竖向位移如图 8 所示。在  $Y = 10$  m 断面处, 地表竖向位移总体上呈现“V”字形分布规律。隧道轴线正上

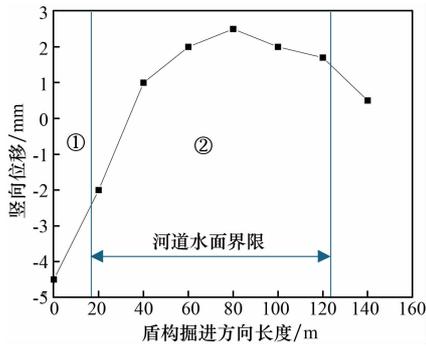


图 6 地表竖向位移分布规律

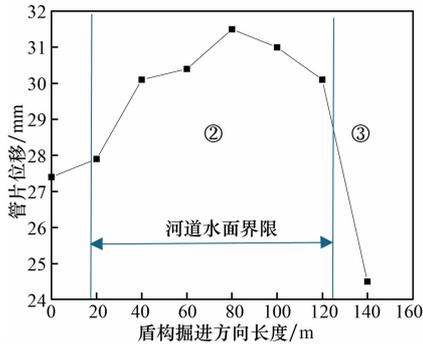
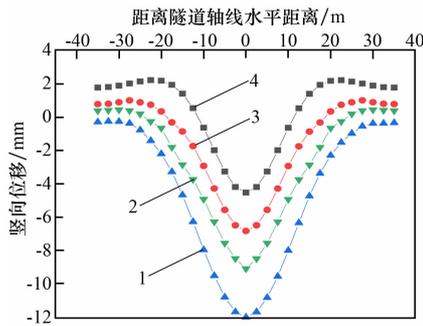


图 7 管片底部竖向位移分布规律

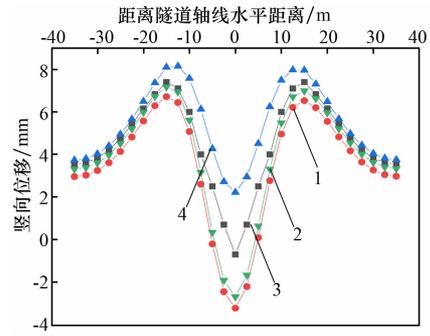


注浆压力/MPa: 1—0.25; 2—0.30; 3—0.35; 4—0.40。

图 8 Y=10 m 断面地表竖向位移

方,地表沉降量最大。随着注浆压力从 0.25 MPa 增大至 0.40 MPa,地表沉降变形的量值及范围均有所减小,隧道中心正上方地表沉降值由 12 mm 减小至 4 mm。远离隧道中心的地表,受隧道开挖的影响较小,由于注浆压力对地层的挤压,以及隧道底部土体的回弹变形,竖向位移表现为隆起变形,隆起变形随着注浆压力的增大而增大,变化幅度较小。

Y=53.5 m 断面地表竖向位移(河流段)如图 9 所示。地表变形呈“M”形分布规律,此断面处在河流段,上覆土厚度较薄,土体自重较小,开挖引起的沉降变形较小。随着注浆压力从 0.25 MPa 增大至 0.35 MPa,隧道中心正上方地表沉降值由



注浆压力/MPa: 1—0.25; 2—0.30; 3—0.35; 4—0.40。

图 9 Y=53.5 m 断面地表竖向位移

3 mm减小至0.8 mm;两侧地表隆起变形变化幅度小,从 3.0 mm 增大至 3.9 mm。当注浆压力达到 0.4 MPa,地表均表现为隆起变形,隆起变形最大值为 8 mm。在相同的注浆压力下,与非河流段相比,地表沉降变形较小,隆起变形较大。

### 3.2 注浆压力对管片竖向位移影响

从图 10 中可以看出,当注浆压力为 0.4 MPa 时,管片底部最大隆起值为 31.7 mm,管片顶部最大沉降量为 2.7 mm。

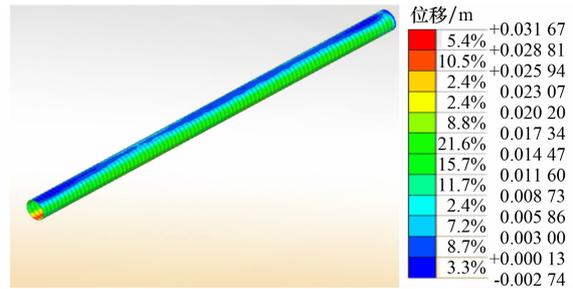
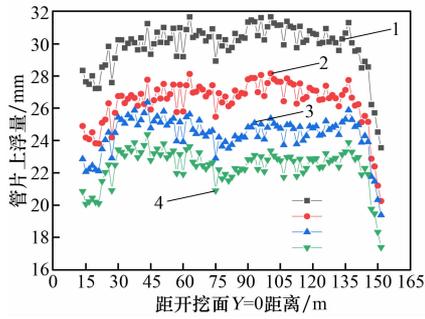


图 10 管片竖向位移云图

图 11 为在不同的注浆压力下,管片上浮量数值。随着注浆压力从 0.25 MPa 增大至 0.40 MPa,管片上浮量增加,最大值由 24.5 mm 增大至 31.7 mm。从曲线图看出,随着距开挖面距离的增加,管片上浮量略有减少,后较快增长,些微波动后下降。在邻近土层开挖未施加注浆压力,土体开挖产生的沉降变形减小了管片的上浮量,当继续开挖并施加注浆压力后,管片上浮量随着距开挖面距离的增加而增加。盾构掘进驶入河流段,上浮量有些微波动,总体上趋于平稳;随后盾构驶出河流段,管片上浮量明显减少。

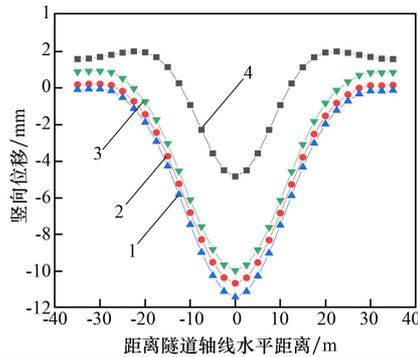
### 3.3 盾构掘进压力对地层变形影响

图 12 为不同掘进压力下 Y=10 m 断面(非河流段)地表横向竖向位移图,地表变形呈“V”形分布规



注浆压力/MPa: 1—0.40; 2—0.35; 3—0.30; 4—0.25。

图 11 不同注浆压力下距开挖面  
Y=0 距离增加管片上浮量变化



掘进压力/MPa: 1—0.28; 2—0.30; 3—0.33; 4—0.35。

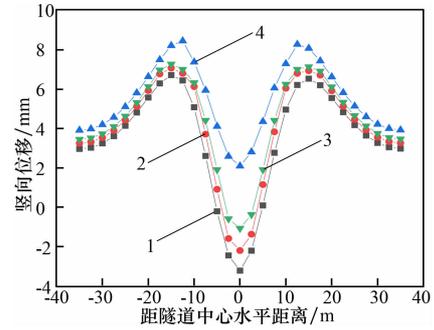
图 12 不同掘进压力下 Y=10 m 断面地表竖向位移图

律。随着掘进压力从 0.28 MPa 增大至 0.35 MPa, 地表沉降变形有所减小, 隧道中心正上方地表沉降值由 11.5 mm 减小至 4.3 mm; 两侧隆起值变化幅度较小, 由 0 mm 增大至 1.8 mm。当盾构掘进压力不大于 0.35 MPa, 地表竖向位移变化较小, 掘进压力的变化对地表竖向位移的影响有限; 当盾构掘进力达到 0.35 MPa, 地表竖向位移值变化明显。

图 13 为不同掘进压力下 Y=53.5 m 断面地表竖向位移(河流段), 大致呈“M”形分布规律。随着掘进压力从 0.28 MPa 增大至 0.33 MPa, 地表沉降变形范围有所减小, 隧道中心正上方地表沉降值由 3.0 mm 减小至 0.8 mm; 两侧隆起值增长较小, 由 3.0 mm 增大至 3.5 mm。当盾构掘进力达到 0.35 MPa, 地表竖向位移变化较大, 竖向位移均表现为隆起变形, 隆起变形最大值为 8.8 mm。由于上覆土厚度较薄, 与非河流段相比, 地表沉降变形较小, 隆起变形较大。

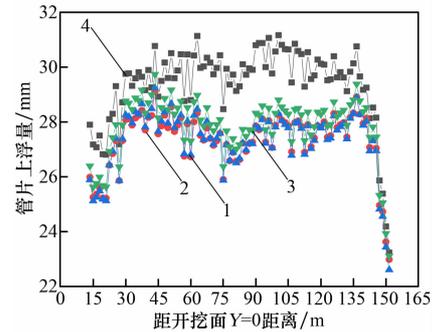
### 3.4 盾构掘进压力对管片竖向位移影响

图 14 为管片上浮量与盾构掘进压力的关系曲线图。随着掘进压力从 0.28 MPa 增大至 0.35 MPa,



掘进压力/MPa: 1—0.28; 2—0.30; 3—0.33; 4—0.35。

图 13 不同掘进力下 Y=53.5 m 断面地表竖向位移



掘进压力/MPa: 1—0.28; 2—0.30; 3—0.33; 4—0.35。

图 14 不同掘进力下随着距开挖面

Y=0 距离增加管片上浮量变化

管片上浮量增加, 最大值由 29.0 mm 增大至 31.5 mm。随着距开挖面 Y=0 距离的增大, 管片上浮量略有减小, 后较快增长, 波动后大幅下降。土体开挖产生的沉降变形减小了管片的上浮量, 同步注浆施加注浆压力后, 产生上浮力, 管片上浮量增加。隧道掘进进入河流段, 上覆土厚度减小, 管片上浮量显著增加, 上浮量数值有一定波动, 随后盾构驶出河流段, 上覆土厚度增大, 管片上浮量减小。

## 4 结论

(1) 盾构下穿河流之前, 沿着盾构掘进方向掌子面上方地表竖向位移为沉降变形, 最大值 4.5 mm; 下穿河流过程中, 随着上覆土层厚度减小, 地表竖向位移为隆起变形, 最大为 2.5 mm。

(2) 盾构下穿河流前, 掘进过程中管片随着地层隆起而上浮, 注浆后管片上浮量约为 27.4 mm; 盾构下穿河流段管片上浮量显著增加, 最大值为 31.7 mm; 盾构掘进出河流段, 管片上浮量再次减小到 24.5 mm。

(3) 管片上浮量与注浆压力正相关。随着注浆压力增大,盾构隧道正上方地表沉降逐渐减小,两侧局部隆起量增大;由于河道中心处上覆土层厚度减小,注浆压力的影响更为明显,在相同的注浆压力下,与非河流段相比,河流段地表沉降变形较小,两侧隆起变形较大,管片上浮量增加;为防止注浆压力击穿上覆土层,建议下穿河流过程中注浆压力控制在 0.25 MPa 左右。

(4) 随着掘进压力的增大,盾构隧道正上方地表沉降逐渐减小,而两侧隆起量逐渐增大;河道中心处掘进压力的影响显著,建议下穿河流过程中掘进压力控制在 0.28 ~ 0.30 MPa。

### 参考文献:

- [1] 高永涛,张鑫磊,李建旺,等. 粉质黏土地层盾构隧道下穿河流地表变形研究[J]. 矿业研究与开发,2022,42(6):79-84.
- [2] 杨志勇,杨星,张长旺,等. 盾构管片上浮量理论计算模型及上浮控制措施研究[J]. 矿业科学学报,2021,6(5):591-597.
- [3] 叶俊能,刘源,陈仁朋,等. 盾构隧道管片施工期容许上浮量研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):4067-4074.
- [4] 叶飞,朱合华,丁文其,等. 施工期盾构隧道上浮机理与控制对策分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008(6):738-743.
- [5] 刘先亮. 盾构隧道下穿河流对管片上浮及地层变形影响研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.
- [6] 李自力,潘青,曹志勇,等. 盾构长距离下穿越河流数值模拟及施工参数优化设计研究[J]. 现代隧道技术. 2020,57(增刊1):442-449.
- [7] 陈孝琼. 盾构隧道下穿河流引起的地层变形规律研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [8] CHEN L, LU L, TANG Z, et al. Effects of parallel undercrossing shield tunnels on river embankment; Field monitoring and numerical analysis [J]. Geomechanics and Engineering. 2023,35(1):29-39.
- [9] FANG Y, WANG H, GUO J, et al. Model test study on the mechanical characteristics of segment linings for the shield tunnel undercrossing the Yellow River [J]. Journal of Hunan University Natural Sciences. 2017,44(5):132-142.
- [10] HUANG J, XU P, HUANG Z. Settlement analysis of Mud-Water shield passing full-face water-rich Sand and cobble stratum under Luo river [J]. Geotechnical and Geological Engineering. 2024,42(1):535-542.
- [11] 梁孝,漆泰岳,陈鹏涛,等. 下穿河流盾构隧道的风险评价体系研究[J]. 铁道建筑. 2020,60(8):64-68.
- [12] XIE X, YANG C, WANG Q, et al. Research on settlement analysis and control measures: a case study of the Nanjing Heyan road river-crossing shield tunnel passing under the Yangtze River embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2021,40:3313-3322.