

盾构小夹角下穿运营隧道扰动特性及 施工因素敏感性分析

沈张勇¹, 曹伟彪¹, 冯云¹, 杨永龙¹, 王颖轶²

(1. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海市 200235; 2. 上海交通大学, 上海市 200030)

摘要: 通过建立符合工程特点的FEM模型,研究了大型盾构隧道超小夹角下穿湖底运营隧道的扰动风险及关键工艺因素的敏感性。重点分析了不同地层损失率(0.5%~3.5%)和注浆压力(欠压、等压、超压)对上部隧道竖向位移、应力分布以及桩基承载特性的影响,以及盾构隧道自身结构稳定状态。结果表明,扰动应力场和位移场呈现非对称三维复杂分布状态,随地层损失率的增大,上部隧道竖向位移和Von Mises应力呈线性增大趋势;下部非均匀卸载引发桩基摩阻力和承载模式的区域差异特性,并与地层损失率和注浆压力等施工因素呈现显著的依存关系;随地层损失率增大,桩基承压性能弱化但抗拔性能增强。研究结果对穿越施工设计及其风险防控具有指导意义。

关键词: 盾构小夹角下穿;数值模型;施工扰动;参数敏感性分析

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0296-06

Disturbance Characteristics and Sensitivity to Construction Factors of Shield Tunneling at Small Angles under Operational Tunnel

SHEN Zhangyong¹, CAO Weibiao¹, FENG Yun¹, YANG Yonglong¹, WANG Yingyi²

(1. Shanghai Tunnel Engineering and Metro Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200235, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: By establishing a FEM model that conforms to the engineering characteristics, the disturbance risk and the sensitivity to key technological factors of a large shield tunneling at a very small angle under a lake-bottom operational tunnel are studied. The influences of different ground loss rates (0.5% to 3.5%) and grouting pressures (under-pressure, equal-pressure and over-pressure) on the vertical displacement and stress distribution of the upper tunnel, the bearing characteristics of the pile foundation, and the stability state of the shield tunnel itself are analyzed in detail. The results show that the disturbance stress field and displacement field present a non-symmetric three-dimensional complex distribution state. With the increase of the ground loss rate, the vertical displacement and Von Mises stress of the upper tunnel show a linear increasing trend. The non-uniform unloading of the lower part causes the regional differences in the frictional resistance and bearing mode of the pile foundation, which show a significant dependence relationship with construction factors such as ground loss rate and grouting pressure. With the increase of the ground loss rate, the pressure-bearing capacity of the pile foundation weakens, but the uplift resistance enhances. The research results have guiding significance for the design and risk control of the shield tunneling.

Keywords: shield tunneling at small angle; numerical model; construction disturbance; parameter sensitivity analysis

0 引言

盾构隧道斜交穿越施工,会引发上部隧道结构非对称扰动应力场和位移场,导致隧道结构张拉和扭转损伤甚至断裂破坏,或位移超限而失去使用功

能。我国设计规范规定隧道斜交穿越的轴线夹角不宜小于 70° ,但由于隧道选线和工程地址的约束,难以回避小于规范要求的极限夹角穿越问题。迄今,人们对盾构隧道穿越施工技术及其扰动风险预控等进行过许多有价值的研究,如李德胜等^[1]采用有限差分方法,研究了盾构下穿对桩基承载力的影响;赵鹏等^[2]、李文举等^[3]、陈向宇等^[4]、潘涛^[5]采用有限元的方法,研究了盾构隧道上跨施工对既有隧道变形的影响、盾构施工对近邻桩基的影响以及对地表建

收稿日期: 2025-10-09

作者简介: 沈张勇(1975—),男,学士,高级工程师,从事地下结构工程设计工作。

通信作者: 杨永龙(1988—),男,硕士,高级工程师,从事地下结构工程设计工作。电子邮箱: 635187167@qq.com

筑物的扰动特性;SHI J等^[6]、伍天华^[7]采用三维离心模型研究了盾构施工对周边桩基的扰动影响;GAN X等^[8]、王瑾^[9]、刘平^[10]、刘帅^[11]、张海超^[12]研究了大型盾构穿越施工过程的位移控制措施;HUANG M等^[13]采用理论和数值模拟相结合方法,研究了下部隧道正交穿越施工的相互影响;HUANG K等^[14]研究了多因素影响下盾构施工对近邻单桩三维扰动位移;高坤等^[15]采用Kerr地基模型及Euler-Bernoulli梁,建立盾构隧道正交穿越已有隧道扰动位移的理论解;Teo P L等^[16]将Hardening Soil model应用于软土地层开挖扰动位移问题。

由于计算区域几何尺寸大、隧道及桩基结构复杂,数值模拟难以协调各种结构和构件的单元类型、尺寸、结构与地层的接触模式;将群桩作用按等效刚度方法简化为变形参数增强的地基土,无法获得桩基的承载特性和承载模式与工程因数的相关性;同时,由于卸载扰动下桩基承载特性的空间差异性,均质化变形等效处理与实际变形特性存在较大差异,导致计算误差甚至错误结果。而现场监测和试验研究,无法获得不同施工因素和参数对应的数据信息,从而无法进行参数敏感性分析和工艺优化,更无法形成机理性和多因素影响下的规律性成果。

本文以锡宜城际轨道交通梅梁湖区间盾构隧道为工程背景,通过建立符合工程特点的FEM模型,针对隧道结构几何特征和桩基受力特点,采用多种单元形式及其力学接触模式,结合塑性硬强化土体本构和桩土接触模型,对盾构隧道与既有隧道、桩基的交汇区进行数值模拟,研究大型盾构小夹角下穿运营隧道的扰动特性、桩基承载特性和承载模式及其施工因素的敏感性。旨在为盾构隧道小夹角穿越工程的设计和施工提供理论支撑,并为制定隧道施工过程中的风险评估和防控措施提供参考。

1 工程特点与三维数值模型

1.1 工程特点

依托工程盾构隧道长距离小夹角下穿运营中沪常高速S58太湖隧道,穿越节点处平面交叉范围约103 m,沿太湖隧道方向范围约为93.7 m,隧道线路间夹角约32°。与上部隧道桩底最小净距13.6 m。穿越段内S58隧道设有8排φ600钻孔桩,桩长25 m,局部为边长500 mm预制方桩(桩长24 m),最深桩底标高约-38.3 m。上下隧道相对位置如图1所示。

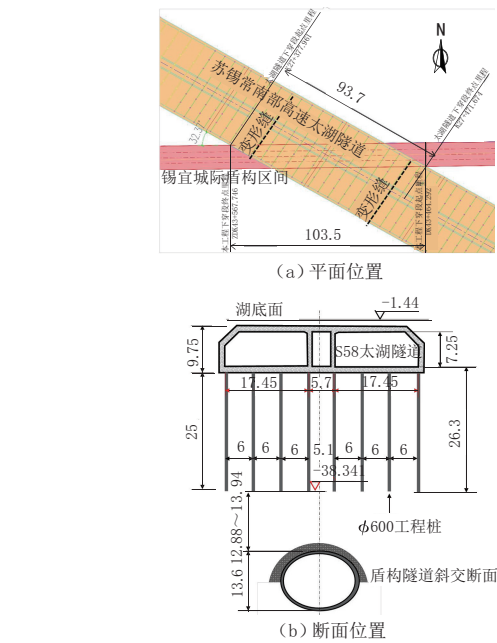


图1 上下隧道空间相对位置关系图(单位:m)

1.2 土体本构及桩土作用模型

考虑盾构穿越施工过程中土体经历往复加卸载及其不同的荷载路径、软黏土的应变硬化特性以及土体在加卸载过程中的刚度差异。采用基于Mohr-Coulomb强度准则的Hardening-Soil本构模型来描述各土层的弹塑性行为。模型考虑土体的刚度与应力历史、加载路径的相关性,以期能较好地模拟隧道施工土体的重复扰动特性、上下隧道、桩基施工对土体的加载和卸载刚度影响,如式(1)所示。

$$\left\{\begin{aligned} E_{50} &= E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi + \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \\ E_{\text{oed}} &= E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi + \sigma'_1 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \\ E_{\text{ur}} &= E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi + \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: q_a 为土体剪切强度的极限值,MPa; q_f 为土体剪切强度,MPa; E_i 为土体初始弹性模量,MPa; E_{50} 为 $q = q_f/2$ 时的割线刚度模量,MPa; E_{ur} 为土体卸载再加载时的刚度模量,MPa。

表1 Hardening-Soil模型各参数取值

$\varphi/(^\circ)$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	ν_{ur}	m	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	R_f	K_0
0	$E_{\text{s1-2}}$	$1.2E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$8E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	0.2	0.5	100	0.9	$1-\sin \varphi$

为模拟桩土间的接触行为,在桩基表面与土体之间设置“无厚度”的Goodman单元,单元正应力与剪应力分别只与法向和切向相对位移有关,其应力应变关系可表达为式(2):

$$\begin{Bmatrix} \tau_s \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_s \\ \omega_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: τ_s 为桩土界面剪应力, MPa; σ_n 为界面的法向接触压应力, MPa; ω_s 为桩土界面切向相对位移, mm; ω_n 为桩土界面法向相对位移, mm; K_s 为界面切向弹簧的刚度, 单位 N/mm³; K_n 为界面法向弹簧的刚度, N/mm³。

接触面采用基于 Coulomb 摩擦定律的摩擦模型控制 Goodman 单元两条直线的滑移条件, 并限制剪应力的最大值。采用摩擦系数 μ 来表征界面的摩擦行为, 接触面滑移的控制条件为:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu \sigma_n \quad (3)$$

式中: τ_{crit} 为接触面的临界剪应力, 当剪应力达到 τ_{crit} 时, 接触面产生滑移, 否则接触面处于黏结状态。

桩土间的摩擦剪应力为:

$$\tau_s = \begin{cases} \tau_{\text{crit}}, & \omega_s \geq \omega_{\text{crit}} \\ K_s \omega_s, & \omega_s < \omega_{\text{crit}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_{crit} 为桩土界面的弹性极限位移 $\omega_{\text{crit}} = \tau_{\text{crit}}/K_s$, mm。

1.3 三维数值模型

1.3.1 基本假设

- (1) 土体为层状异性体, 符合弹塑性模型。
- (2) 桩土接触界面法向两侧对象不可相互侵入, 切向满足 Coulomb 摩擦模型。
- (3) 施工过程中桩土界面的摩擦系数不变。
- (4) 不考虑桩和隧道结构的脱离。

1.3.2 三维数值模型

盾构穿越施工三维数值模型如图 2 所示。

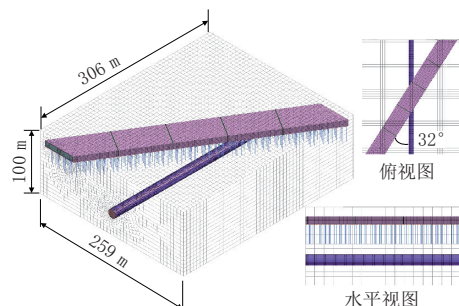


图2 盾构斜交下穿的三维有限元模型(单位:m)

模型 X, Y, Z 向的尺寸分别为 259, 306, 100 m, X 为横向, Y 为轴向, Z 为深度方向。

将盾构施工简化为土体开挖、管片施作、壁后注浆、浆液硬化四个阶段。其中, 在土体开挖步中, 施加掌子面的泥水压力, 大小为 597.6 kPa, 在壁后注浆步中, 此部分分析不施加注浆压力, 重复上述开挖步骤, 直到完成整个盾构开挖过程。

1.3.3 模型及地层参数

参照依托工程设计资料, 太湖隧道采用 C40 现浇混凝土; 变形缝处设钢边橡胶止水带; 桩基础为 C35 混凝土; 盾构隧道管片衬砌为 C60 混凝土, 外径 13.6 m, 厚度 55 cm, 环宽 200 cm; 盾壳厚度 10 cm, 盾尾间隙为 10 cm。

土体的物理力学参数见表 2, 隧道及桩基材料的物理力学参数如表 3 所示。

表2 试验填土物理力学参数

土种类	重度/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
粉质黏土	18.9	50.84	0.35	12.8	25.2

表3 隧道和桩基材料的物理力学参数

名称	材料	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
上部隧道	隧道结构	25	30	0.2
桩基	桩基混凝土	25	31.5	0.2
盾构隧道	混凝土管片	25	36	0.2
	盾壳	78.5	208	0.2
	硬化后浆液	20	5	0.3

参考前人研究, 取桩土接触界面的摩擦角 δ 与土体内摩擦角 φ 的比值为 0.6, 桩土界面参数如表 4 所示。

表4 桩土界面参数

名称	K_s /MPa	K_n /GPa	δ	μ
桩土界面参数	269	2.96	7.68	0.135

1.3.4 单元及处理

模型中, 桩基采用一维梁单元, 桩土接触界面采用 Goodman 单元, 管片和盾壳采用四节点二维板单元; 土体和其余结构采用由 Hexahedron 单元、金字塔单元及 Tetrahedron 单元组成的三维混合单元。模型各侧面施加法向线位移约束, 底面固定, 顶面自由, 桩单元施加 Z 向的转动约束。在模型中采用改变单元属性的方法实现盾构开挖和浆液的硬化。

2 下穿施工扰动特性及其参数敏感性

2.1 上部隧道变形特征

数值模拟得到上部隧道的竖向位移分布如图 3 所示。

由图 3 可知, 竖向位移呈现明显的不对称特征, 盾构隧道斜交下穿引起了隧道的扭转变形。上部隧道竖向位移在盾构隧道穿越上部隧道的位置处最大, 距相交位置越远, 竖向位移越小。竖向位移的峰值点位于盾构隧道轴线投影面上。

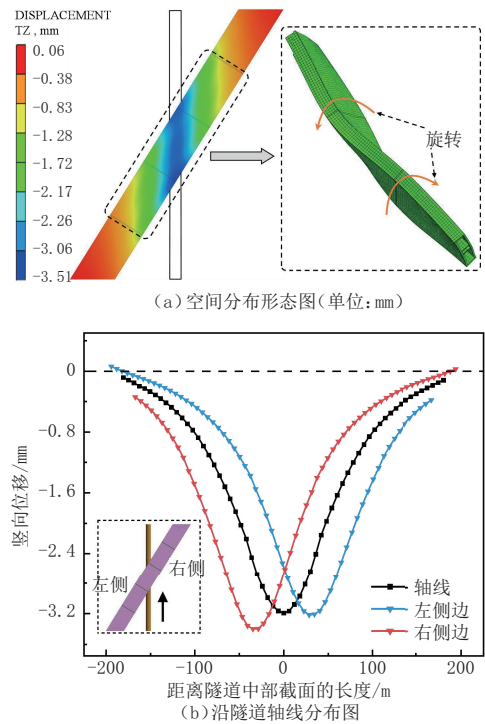


图3 上部隧道竖向位移图

2.2 桩基承载力和承载模式变化

计算获得了盾构下穿开挖引起的桩基扰动位移和轴力。取典型位置桩基状态做概要分析。其中竖向投影位于盾构隧道开挖范围内的桩的编号为 $P_1 \sim P_5$, 竖向投影位于盾构隧道开挖范围的一侧的桩的编号为 $P_6 \sim P_{10}$ 。

如图4所示,正值表示摩擦力方向竖直向上,负值表示摩擦力方向竖直向下。由图4(a)可以看出,盾构隧道水平投影面内(编号为 $P_1 \sim P_5$)的桩基在一定深度范围内的侧摩擦力方向发生变化,出现零摩擦力点,中性点上部为正摩阻且较之盾构开挖前摩阻力显著增大;中性点下部桩体呈负摩擦力,且随深度急剧变化;水平投影越接近盾构轴线处,桩基负摩阻力越大。图4(b)中,远离盾构隧道水平投影区的桩基(编号 $P_6 \sim P_9$),上部出现摩阻力降低区、下部出现摩阻力增高区。而 P_{10} 桩邻近盾构开挖范围,桩端摩擦力小于盾构开挖前,且邻近桩端的桩身摩擦力方向呈反向发展的趋势。

可见,盾构施工对上部桩基的受力状态和承载模式产生显著影响,且影响程度随桩基与盾构隧道空间相对位置而变化,具有明显的空间差异特征。

2.3 地层损失率影响分析

在施工中,包括注浆压力大小在内的施工条件和施工参数会产生不同的地层损失,为研究地层损失率 ε_0 对上部隧道和桩基的影响,取4组地层损失

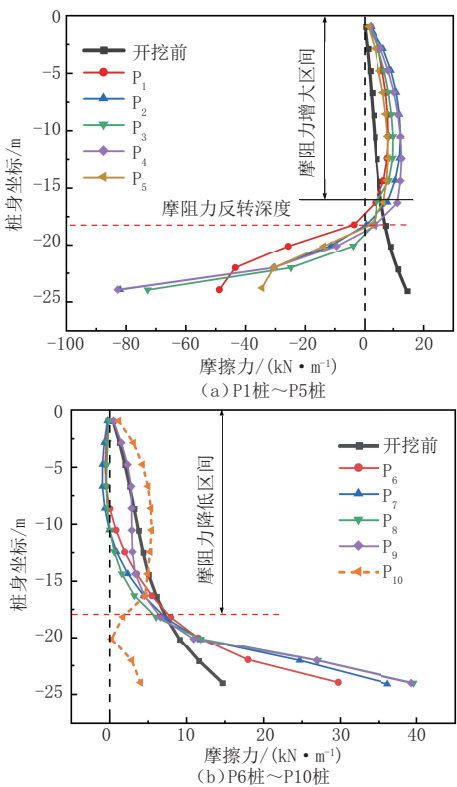


图4 不同位置的桩身摩擦力图

率 $\varepsilon_0 = \{0.5\%, 1.5\%, 2.5\%, 3.5\%\}$, 计算得到上部隧道的竖向位移和 Von Mises 应力分布、桩基摩擦力和轴力以及盾构隧道周围土体的塑性区域。

2.3.1 上部隧道的竖向位移

对应不同底层损失率,上部隧道的竖向位移分布如图5所示。

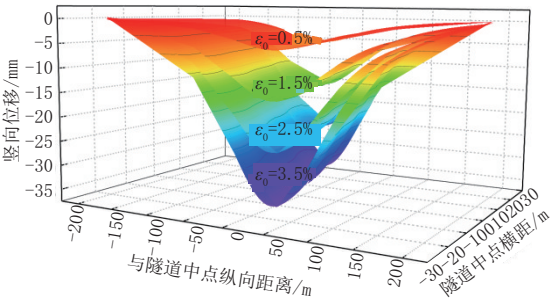


图5 不同地层损失率下上部隧道的竖向位移(单位:mm)

结果显示:(1)上部隧道竖向位移总体呈现峰值分布特征,峰值点位于盾构隧道轴线水平投影线上,随盾构隧道轴线两侧距离增大,位移减小并逐渐趋于零;(2)随地层损失率的增大,上部隧道竖向位移呈等比例增大趋势;(3)沉降位移空间分布形态及其扰动边界不受地层损失率的影响。

2.3.2 上部隧道的 Von Mises 应力分布

不同地层损失率下上部隧道的 Von Mises 应力如图6所示。

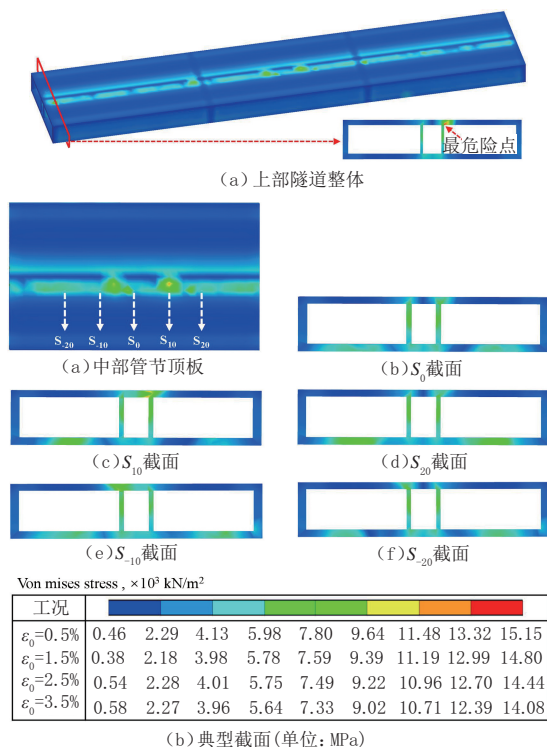


图6 不同土体损失率上部隧道的Von Mises应力分布云图

结果显示:(1)各截面内均存在明显的应力集中区域,隧道廊道区域、地板跨中区域应力集中程度较高;(2)不同地层损失率条件下,隧道结构各断面内应力集中区域及其分布形态不变;(3)最大值始终出现在与中部截面相距10 m的S10截面处,随着地层损失率的增大,中部管节 Von Mises 应力最大值反而减小。

2.3.3 桩基摩擦力和轴力

取P₁桩为研究对象,不同地层损失率条件下桩基摩擦力和轴力沿深度分布如图7所示。

可以看出,盾构开挖后,P₁桩的下部桩身摩擦方向向下,负摩擦力的值也随着地层损失率的增大而增大,且摩擦力零点位置随着地层损失率的增大而上移;在所探讨的各地层损失率的条件下,P₁桩身轴力增量均为拉力,不同程度降低了桩基的承载力而有利于提高桩基的抗拔力。综上所述,地层损失率的增大会极大削弱桩的承载能力,影响桩的承载模式;但对于抗拔桩而言,扰动产生的桩基负摩阻有利于提高其抗拔力。

2.3.4 周边土体塑性区域

不同地层损失率下盾构隧道周围土体的塑性区半径R_p如图8所示。

当 $\varepsilon_0 = 0.5\%$ 时,盾构隧道周围土体并未进入塑性状态,而当 ε_0 为1.5%,2.5%及3.5%的情况下,隧道周围土体进入塑性状态,且塑性区半径R_p随地层损

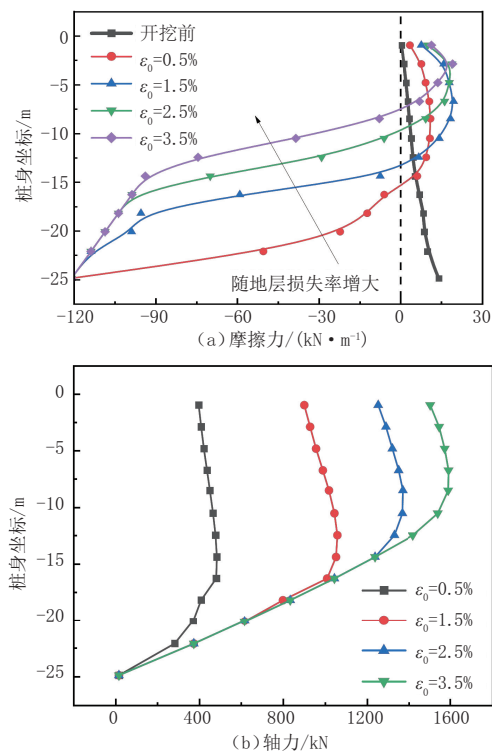


图7 不同地层损失率桩基摩擦力和轴力图

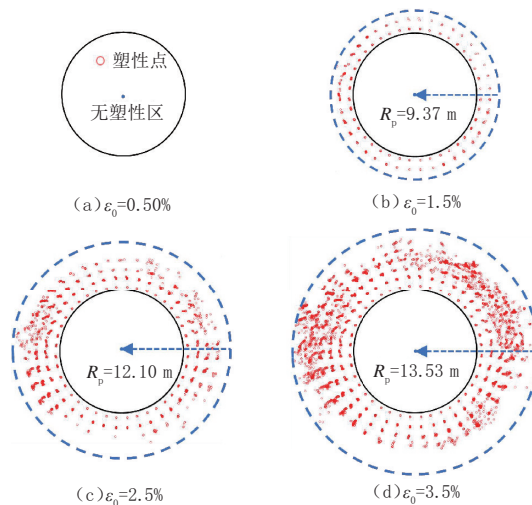


图8 不同地层损失率下盾构隧道周围土体塑性区(单位:m)

失率的增大而增大。

2.4 同步注浆工艺及参数模拟

盾构开挖过程中,为了及时填充盾尾脱出产生的环状空隙,防止地层产生较大沉降,需要进行同步注浆。注浆压力较小,会导致浆液无法充分填充空隙、地层沉降过大;而注浆压力较大,反而会导致地层产生隆起,也会对上部隧道结构产生扰动,从而威胁隧道及邻近建筑物的安全。

为研究注浆压力P对上部隧道及其桩基的扰动影响,在保持数值模型特性和其他计算参数不变的前提下,取 $P=\{0.8, 1.0, 1.2, 1.4\}$ MPa,分别对应注浆压力比例系数 $\eta=\{0.7, 0.85, 1.0, 1.15\}$ 。得到上部隧

道的竖向位移、Von Mises 应力分布、桩基的摩擦力和轴力。

2.4.1 上部隧道的竖向位移

上部隧道竖向位移空间分布如图 9 所示。

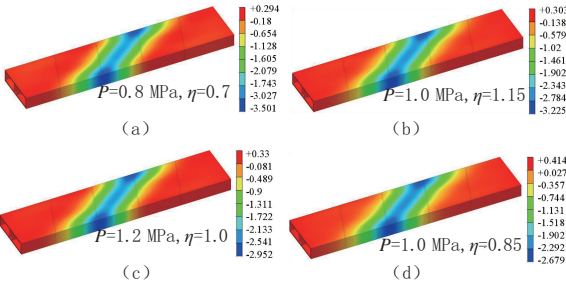


图 9 不同注浆压力下上部隧道竖向位移比较图(单位:mm)

上述 4 种注浆压力下的上部隧道竖向位移空间分布形态基本相同。盾构水平投影线呈现沉降状态,沉降位移峰值位于盾构隧道轴线的水平投影线上,两侧逐步减小并趋于上浮。随注浆压力增加,沉降槽位移减小,两侧上浮位移有少量增大。最大沉降和最大隆起分别约为-3.5 mm 和 0.414 mm。

2.4.2 上部隧道的 Von Mises 应力分布

不同注浆压力下上部隧道的 Von Mises 应力如图 10 所示。

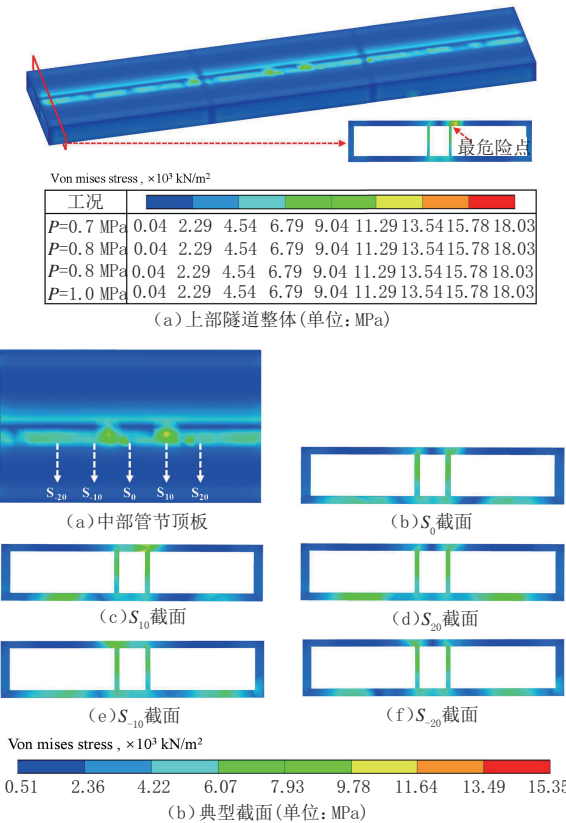


图 10 不同注浆压力下上部隧道 Von Mises 应力分布图

各注浆压力压力下的 Von Mises 应力分布以及应力大小保持一致,其中最大 Von Mises 应力为 18.031 MPa。

$S_{-20}, S_{-20}, S_0, S_{10}, S_{20}$ (相邻间距均为 10 m) 的典型截面上的 Von Mises 应力分布显示,在每个截面的肋板和廊道两侧的底板位置上 Von Mises 应力大于截面内其余位置的 Von Mises 应力,最大值出现在与中部截面相距 10 m 的 S_{10} 截面处,其值为 15.347 MPa,与整条隧道的最危险点的应力仅相差 14.9%。

3 结 论

(1) 研究结果表明,盾构穿越施工扰动下,桩基摩擦力出现反向作用或呈现负摩擦力增长趋势,桩的承载能力大幅降低。距盾构轴线越近,桩的负摩擦力越大,导致桩基承载模式显著变化。

(2) 注浆压力在 1.0 MPa 内时,其对地层的扰动范围边界距盾构隧道中心约 20 m 以内,且注浆压力对上部隧道的扰动位移、应力、桩基承载力和承载模式影响甚微。

(3) 地层损失率对上部隧道和桩基的影响显著,其最大沉降、最大 Von Mises 应力均随着 ε_0 的增大而线性增大;对于影响最大的 P_1 桩,桩身拉力和负摩擦力随着 ε_0 的增大而增大,摩擦力零值点随着 ε_0 的增大而上移;地层损失率较大时,盾构隧道周围土体进入塑性状态且塑性区半径随着地层损失率增大而增大。

参考文献:

[1] 李德胜,李大勇. 盾构机下穿桩基施工对单桩承载力影响的数值研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 284-288.

[2] 赵宇鹏,陈道政. 盾构隧道上跨施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(11): 1525-1530.

[3] 李文举,武亚军,常莹. 隧道盾构施工对临近桩基影响的数值模拟[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2010, 16(2): 210-215.

[4] 陈向宇,廖万金,罗桂军,等. 地铁盾构施工穿越桩基的影响分析[J]. 建筑机械化, 2023, 44(8): 22-26.

[5] 潘涛. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 101-108.

[6] SHI J, WANG Y, NG C W W. Three-dimensional centrifuge modeling of ground and pipeline response to tunnel excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142 (11) : 04016054-04016067.

[7] 伍天华. 隧道盾构施工扰动对既有桩基性能影响机理及控制技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.

[8] GAN X, YU J, GONG X, et al. Characteristics and countermeasures of tunnel heave due to large-diameter shield tunneling underneath[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34 (1) : 04019081-04019091.

[9] 王瑾. 超大直径盾构近距离穿越运营中轨道交通施工技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(1): 36-39.

(下转第 324 页)