

复杂地层下大型泥水盾构隧道掘进 关键技术研究

——以珠海隧道为例

赵子腾¹, 任 辉^{2,3}, 郭保和^{2,3}, 包鹤立⁴

¹同济大学土木工程学院, 上海

²中山大学土木工程学院, 广东 珠海

³珠海市轨道交通有限公司, 广东 珠海

⁴上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

本文依托珠海隧道工程, 综合运用数值模拟与理论分析方法, 重点探讨了泥水盾构在穿越淤泥质粉质黏土等复杂地层时的两个关键技术问题: 一是盾构掘进引起的隧道承载力及地层变形规律; 二是掘进过程中开挖面的支护压力范围与稳定性控制。研究通过Abaqus有限元模拟软件建立了四种典型地质断面的二维模型, 模拟分析了不同工况下的隧道结构收敛与地表沉降情况。同时, 基于土体破坏理论, 计算了不同地层条件下的泥水支护压力上下限。研究表明: 隧道埋深与下卧土层特性是影响管片收敛变形和地表沉降的主要因素, S2断面(深埋、下卧层薄弱)的收敛变形与沉降值最大, 但仍在规范允许范围内; 泥水支护压力的安全区间与地层性质(黏性土或砂性土)及覆土厚度密切相关, 砂性地层中的操作空间显著小于黏性地层。

关键词

泥水盾构, 数值模拟, 承载力分析, 开挖面稳定性, 支护压力

Key Technologies for Large-Scale Slurry Shield Tunnel Excavation in Complex Geological Formations

—Taking Zhuhai Tunnel as an Example

Ziteng Zhao¹, Hui Ren^{2,3}, Baohe Guo^{2,3}, Heli Bao⁴

¹School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

文章引用: 赵子腾, 任辉, 郭保和, 包鹤立. 复杂地层下大型泥水盾构隧道掘进关键技术研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2495-2506. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410269

²School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai Guangdong³Zhuhai Rail Transit Co. Ltd., Zhuhai Guangdong⁴Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: September 22, 2025; accepted: October 12, 2025; published: October 28, 2025

Abstract

This paper, based on the Zhuhai Tunnel Project, comprehensively employs numerical simulation and theoretical analysis methods to focus on two key technical issues concerning slurry shield tunneling through complex formations such as muddy silty clay: first, the tunnel bearing capacity and deformation patterns induced by shield advancement; second, the range of support pressure at the excavation face and stability control during tunneling. Using Abaqus finite element simulation software, two-dimensional models of four typical geological cross-sections were established to simulate and analyze tunnel structure convergence and ground settlement under various operating conditions. Concurrently, based on soil failure theory, the upper and lower limits of slurry support pressure were calculated for different geological conditions. The results indicate that tunnel burial depth and underlying soil properties are the primary factors influencing segment convergence deformation and ground settlement. Section S2 (deep burial depth, weak underlying layer) exhibited the greatest convergence deformation and settlement values, though still within allowances. The safe range of slurry support pressure is closely related to soil properties (clay or sandy soil) and overburden thickness, with significantly less operational margin in sandy formations compared to clay formations.

Keywords

Slurry Shield, Numerical Simulation, Support Pressure Analysis, Excavation Face Stability, Support Pressure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

随着我国沿海经济带的快速发展和城市化进程的不断深入,跨江、跨海通道已成为连接区域交通网络、突破地理瓶颈的关键基础设施[1]。其中,大直径泥水平衡盾构隧道以其施工速度快、环境影响小、安全系数高等优势[2],在该领域得到了广泛应用。然而,在沿海地区常见的软弱、复杂地层(如淤泥质粉质黏土、上软下硬复合地层等)中施工,盾构掘进极易引发一系列工程难题。

首先,开挖扰动会打破地层的初始应力平衡,导致土体应力释放,进而引起隧道结构变形与地表不均匀沉降,威胁施工安全。已有许多学者对于大直径泥水盾构穿越复杂地层引起的地层变形进行了相关研究。刘方等[3]基于京张高铁清华园隧道工程,建立了三维数值模型,研究了大直径盾构在浅覆土条件下的地层变形情况;韩先才等[4]依托苏通 GIL 综合管廊工程,建立了盾构越江数值模型,分析了盾构穿越江堤过程中的地表沉降;苏凤阳等[5]以环城北路-天目山路提升改造工程为背景,分析了上软下硬地层中大直径泥水盾构施工对周围土体变形的影响;程烨等[6]结合深圳妈湾跨海通道工程,利用 Abaqus 建

立了数值模型,研究了上软下硬地层中超大直径泥水盾构对地表沉降的影响;赫明胜[7]结合武汉市轨道交通 12 号线越江隧道工程,建立了三维有限元模型,研究了分步开挖下的地表沉降;聂善军等[8]利用数值模拟研究了上软下硬地层中注浆压力、掌子面压力等因素对隧道变形的影响;李志义等[9]以上海北横通道为背景,分析了浅覆土盾构施工引起的地表及深层土地的变形规律。

其次,维持开挖面的稳定是泥水盾构施工的核心,支护压力过小会导致掌子面失稳坍塌,压力过大则可能引起泥浆沿薄弱路径劈裂,甚至喷发至地表,造成严重工程事故。许多学者对于泥水盾构隧道开挖面稳定性方面进行了广泛研究。张亚峰等[10]利用模型试验和颗粒流离散元法模拟了干砂地层开挖面失稳破坏过程,研究了开挖面失稳破坏模式和极限支护力变化规律;刘继强等[11]依托妈湾海底隧道,建立了不同地层条件下的三维数值模型,研究了复杂地层泥水压力对开挖面稳定性的影响;沈津津等[12]以杭州市环城北路-天目山路工程为背景,研究了上软下硬地层泥水盾构隧道的泥膜保压及开挖面稳定性;吕乾乾等[13]依托厦门轨道交通 2 号线跨海区间盾构隧道工程,利用颗粒流方法模拟分析了典型地层开挖面的稳定性;陈仁朋等[14]通过模型试验研究了埋深比对于开挖面极限支护力的影响;刘泉维等[15]通过大尺寸模型试验研究了两种地层中水头高度对于开挖面主动破坏的影响。

本文依托珠海隧道工程,综合运用数值模拟与理论分析方法,对泥水盾构在复杂软弱地层掘进中地层变形及开挖面稳定性方面展开研究。首先,利用 Abaqus 有限元软件,建立不同地质特征的典型断面模型,分析了盾构掘进引起的隧道结构收敛与地层沉降规律;其次,通过理论分析计算了不同地层条件下的泥水支护压力上下限,给出了保持开挖面稳定的安全压力区间。

2. 盾构穿越复杂地层承载力分析

根据珠海隧道工程初步勘察阶段岩土工程勘察报告,隧道全线穿越的地层复杂,包含软弱淤泥层和较坚硬的中风化花岗岩层。隧道掘进时软弱下卧层段隧道的变形和软弱不均地层段的不均匀沉降等重难点问题,需要通过数值模拟分析结果来校验,以确保施工的安全性。本文采用大型通用有限元软件 Abaqus 对施工过程中多个典型地层截面进行模拟分析。

2.1. 典型断面选取

采用二维平面应变问题模拟珠海隧道施工过程。由于隧道左、右线施工先后次序,且左、右线盾构开挖面相距较远,相互影响较小,因此主要研究不同软弱地层中盾构掘进对隧道上浮及地表沉降的规律,为提高分析效率,所以仅考虑单线隧道施工。模拟选取了 4 个典型断面:

- 1) Section 1 (CQZK43): 隧道初始掘进段,埋深较浅,下卧层软弱;
- 2) Section 2 (CQZK30): 隧道掘进中段,埋深大,下卧层软弱;
- 3) Section 3 (CQZK16): 隧道掘进中段,埋深大,穿越地层复杂;
- 4) Section 4 (SQZK14): 隧道掘进尾段,埋深较浅,地层上软下硬。

4 处典型断面地层分布如图 1 所示。S1 (Section 1 简写, S2~S4 用法相同)断面上覆水 4.09 m,隧道拱顶埋深 10.31 m; S2 断面上覆水 9.6 m,隧道拱顶埋深 15.92 m; S3 断面上覆水 11.11 m,隧道拱顶埋深 10.1 m; S4 断面上覆水 6.88 m,隧道拱顶埋深 11.28 m。

2.2. 有限元计算模型

依据选取的 4 个典型断面,结合工程地质勘查资料,采用 Abaqus 有限元计算软件,分别构建 4 种不同复合地层下有限元模型,进行模拟计算。4 个模型除地层分布、隧道埋深不同外,其他模拟过程均相同,选取其一对模型进行详细介绍,如图 2 所示。

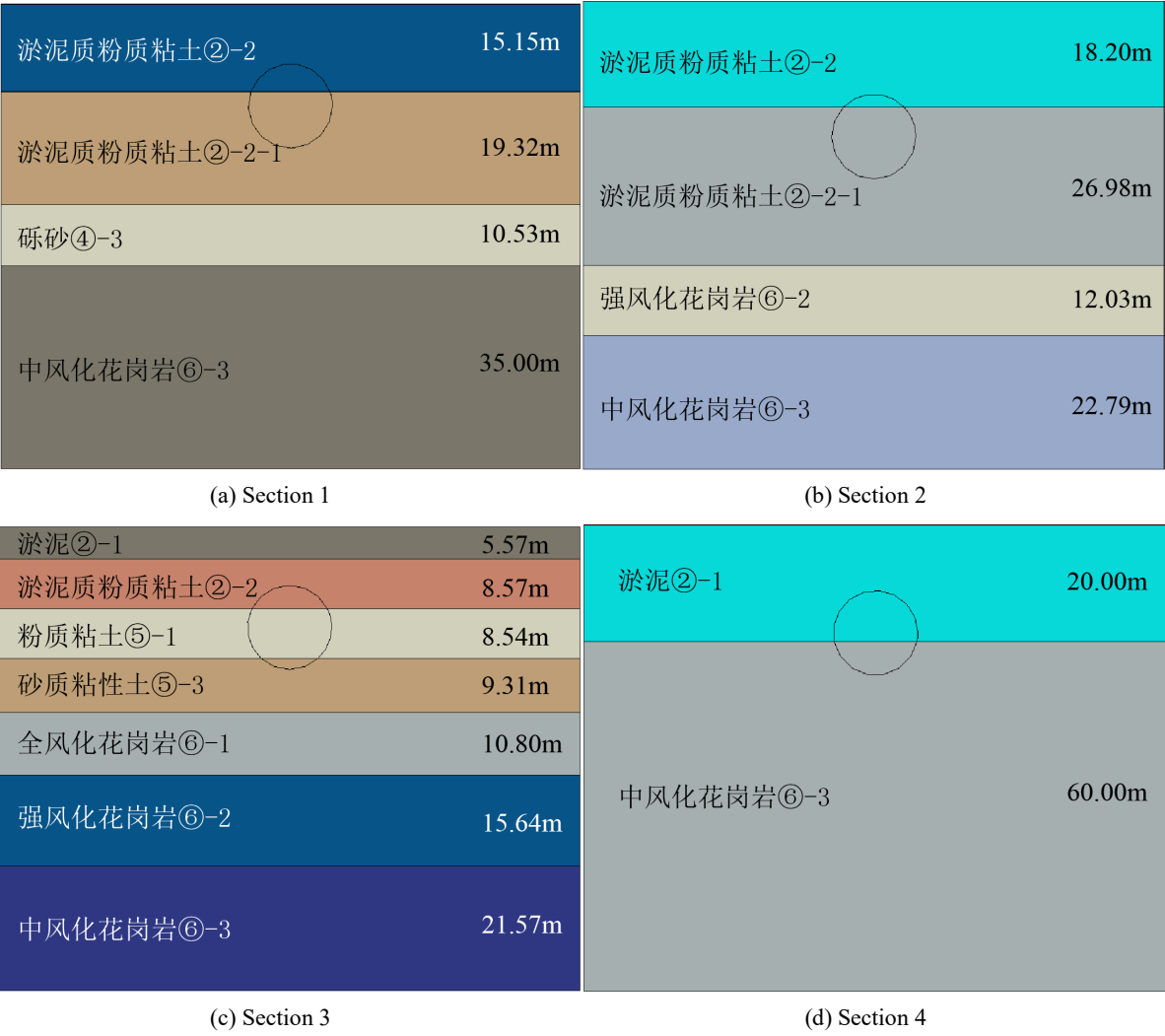


Figure 1. Typical stratigraphic distribution
图 1. 典型地层分布

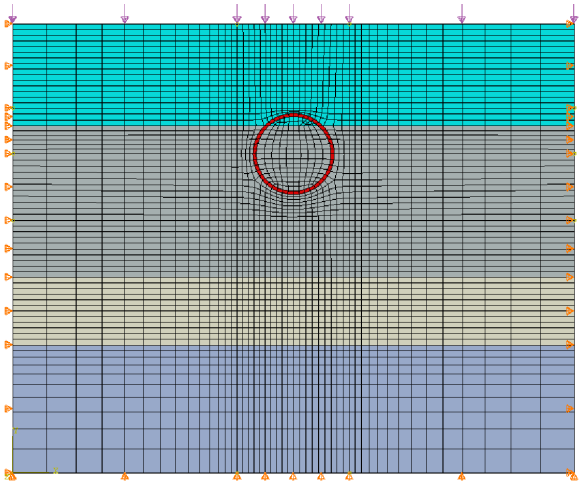


Figure 2. Numerical model
图 2. 数值模型

2.2.1. 模型基本参数

模型几何尺寸为 100 m × 80 m，隧道衬砌外径 14.5 m，衬砌环厚度 600 mm。

模型边界条件：左右侧面限制其水平位移，底面约束竖向位移，上表面为地表。模型左右两边计算土体的长度约为隧道半径 6 倍，以保证模型竖向变形不受边界条件影响。

模型荷载条件：地层表面施加水荷载，荷载大小根据不同断面处水位确定。所有构件(土层、衬砌)均受自重力作用。

2.2.2. 材料参数

岩土体与混凝土衬砌管片均采用四节点双线性网格 CPE4R，网格单元数 4000~6000。岩土本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型，物理力学参数见表 1。岩土体与衬砌管片之间的接触面采用 Tie 接触，衬砌管片(C60 混凝土)根据规范弹性模量取为 36 GPa，泊松比取为 0.20。

Table 1. Physical and mechanical properties of rock and soil
表 1. 岩土体物理力学参数

土层	密度/g/cm ³	粘聚力/kPa	内摩擦角/°	弹性模量/MPa	泊松比
淤泥②-1	1.61	13	11.0	8	0.34
淤泥质粉质粘土②-2	1.74	16	13.5	13	0.32
淤泥质粉质粘土②-2-1	1.72	15	13.0	11.5	0.32
砾砂④-3	1.98	1	30.0	30	0.30
粉质粘土⑤-1	1.88	25	12.7	23.5	0.32
砂质粘性土⑤-3	1.86	23	20.6	21	0.29
全风化花岗岩⑥-1	1.89	25	23.7	24	0.26
强风化花岗岩⑥-2	2.20	45	30.0	40	0.26
中风化花岗岩⑥-3	2.65	50	36.0	60	0.25

2.2.3. 隧道掘进模拟

隧道的开挖模拟问题，其实质是应力的释放。土体开挖和衬砌激活顺序应与实际相符合。考虑到隧道开挖中的地层损失，本文采用软化模量法进行隧道开挖模拟。模拟过程为：

第一步：施加上覆水荷载与自重荷载，对模型进行地应力平衡，形成初始应力场。

第二步：将开挖区域单元模量降低，模拟应力释放效应。

第三步：杀死开挖土体单元，激活衬砌单元。

第四步：平衡计算。

施工模拟流程如图 3 所示。

2.3. 模拟结果分析

4 处断面隧道开挖完成后土体与衬砌位移云图如图 4 所示。由图可知，受开挖影响，管片上方土体发生沉降变形，土体表面形成了明显的沉降槽；管片底部土体受应力释放影响，发生了一定的隆起变形；受水土荷载作用，衬砌管片变形为“横鸭蛋”形状。

S1~S4 断面管片拱底、拱顶、两腰、地面处的土体沉降变形和管片收敛变形数据如表 2 所示(收敛变形负号代表沿直径方向收缩，正号代表沿直径方向扩张；沉降变形负号代表沉降，正号代表隆起)。

将收敛变形数据沿断面所在位置绘制曲线如图 5 (a)所示。S2 断面处，隧道埋深大，下卧层厚且薄弱，

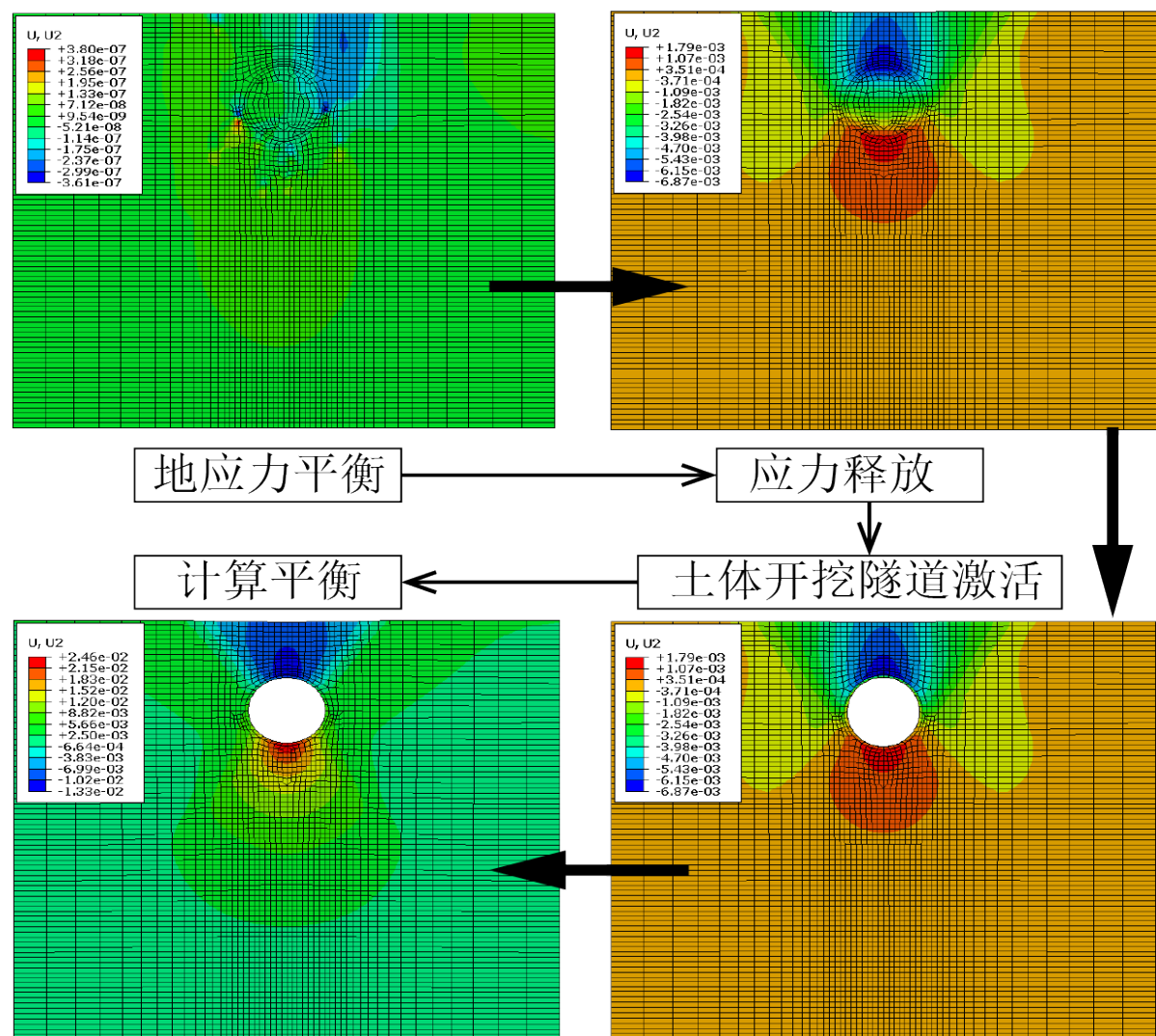
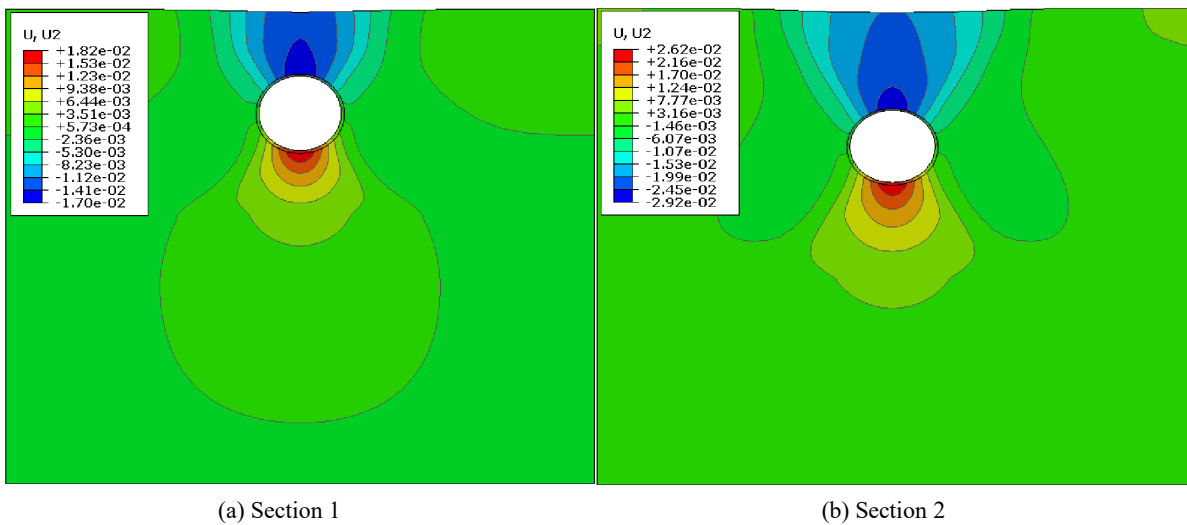


Figure 3. Tunnel construction simulation process
图 3. 隧道施工模拟流程



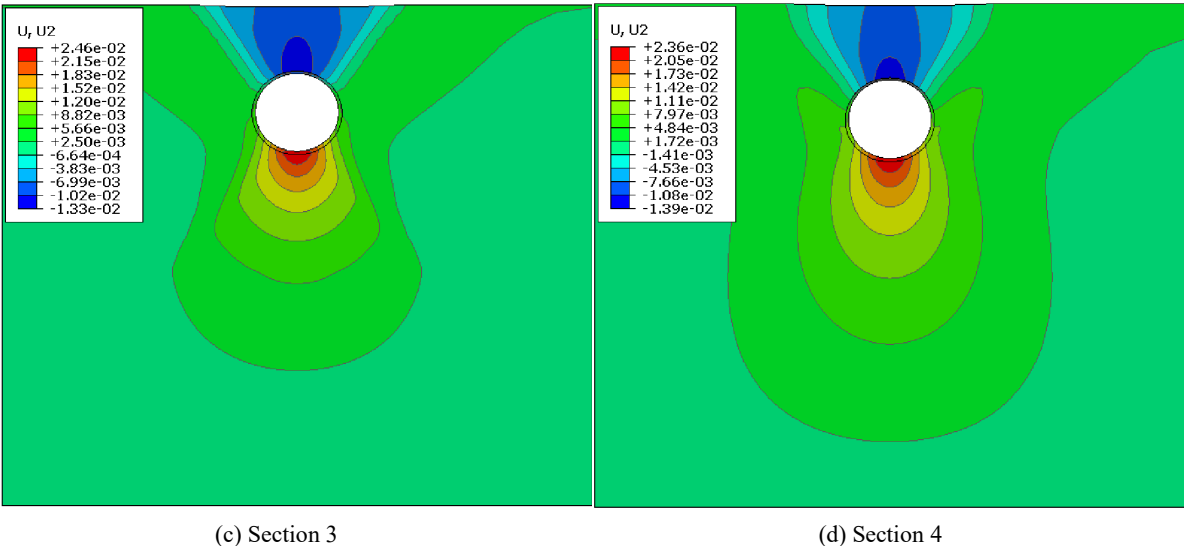


Figure 4. Vertical displacement contour map for typical cross-sections (deformation magnification factor: 30)
图 4. 典型断面竖向位移云图(变形放大系数: 30)

Table 2. Convergence deformation and settlement deformation at key nodes (cm)
表 2. 衬砌收敛变形与关键节点土体沉降变形(cm)

截面	收敛变形		沉降变形			
	竖向	水平	拱顶	拱底	左右腰	地表
S1 (+141 m)	-2.38	2.25	-1.7	1.81	-0.06	-1.34
S2 (+818 m)	-3.88	3.68	-2.91	2.62	-0.27	-2.01
S3 (+2022 m)	-2.92	2.75	-1.33	2.46	0.55	-0.91
S4 (+2426 m)	-2.6	2.44	-1.39	2.35	0.66	-0.84

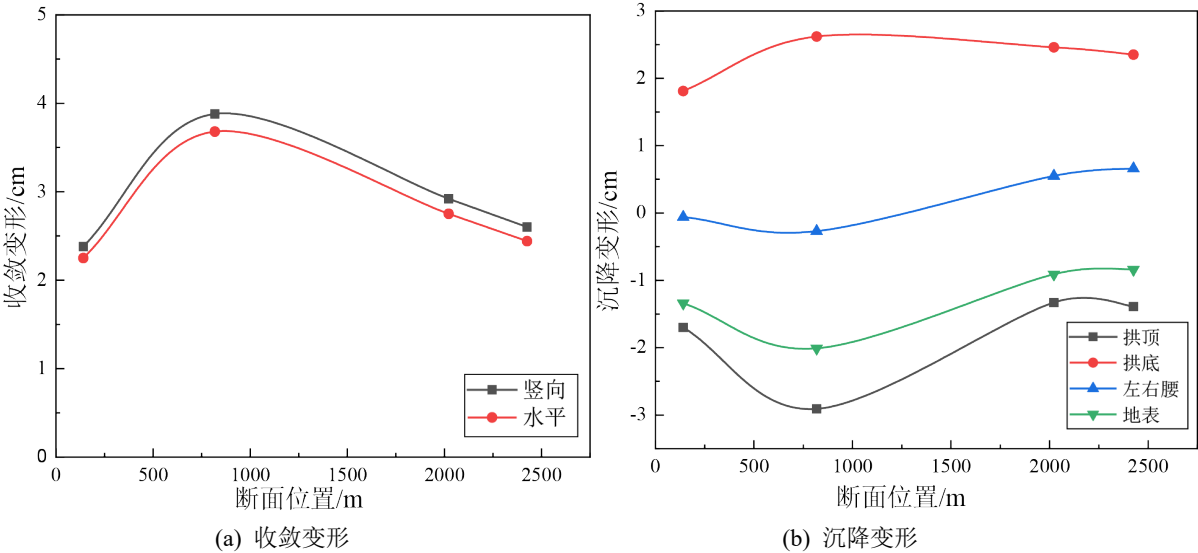


Figure 5. Distribution of deformation along the cross-section
图 5. 变形沿断面分布情况

管片收敛变形最大,为隧道外径的 2.7‰,满足规范要求 3‰要求。收敛变形大小次序为 $S2 > S3 > S4 > S1$ 。S1~S2 断面之间管片收敛变形差值最大,为 1.5 cm,沿线长 677 m(约 338 环),则平均每环收敛变形差为 0.044 mm,管片之间错台较小。

将沉降变形数据沿断面所在位置绘制曲线如图 5(b)所示。土体的最大沉降变形和隆起变形分别发生在隧道拱顶和拱底处。S2 断面处,隧道埋深大,下卧层厚且薄弱,管片沉降、隆起变形最大,分别为 -2.91 cm 和 2.62 cm,符合规范要求。沉降变形大小次序为 $S2 > S1 > S4 > S3$,隆起变形大小次序 $S2 > S3 > S4 > S1$ 。S1~S2 断面之间沉降变形差值为 1.21 cm,沿线长 677 m(约 338 环),则平均每环不均匀沉降为 0.036 mm; S2~S3 断面之间沉降变形差值为 1.58 cm,沿线长 1204 m(约 602 环),则平均每环不均匀沉降为 0.026 mm,不均匀沉降变形较小,符合规范要求。

3. 盾构掘进开挖面稳定性分析

3.1. 泥水平衡盾构掘进开挖面支护压力范围理论

跨海隧道修建时受工程造价等因素影响,其上方土体的厚度通常较浅,同时上方存在着较深的水体。在这种条件下为了保证开挖面的稳定性,对泥水压力的控制提出了很高的要求。泥水压力过小时不足以支撑开挖面前方水土压力,从而导致前方土体涌入盾构机泥水仓。而当泥水压力过大时,泥浆会冲破泥膜,劈裂地层。因此泥水压力的设定既要保持开挖面稳定,又要防止泥水劈裂地层。

泥水平衡盾构对于开挖面的支护效果,关键在于开挖面上形成的低渗透性泥膜。泥膜是由泥浆颗粒渗入地层孔隙并不断堆积而形成的,其成型状态决定了支护的效果。同时粒径比决定了泥膜的状态[16]。根据粒径比把泥膜分为 3 种类型:泥皮型、渗透带型和泥皮 + 渗透带型。对于低渗透性的黏土,只要泥浆压力值等于地层土水压力值,即可保持开挖面稳定。而对于高渗透性的砂砾地层,必须形成有效的泥膜(泥皮或泥皮 + 渗透带),将部分泥浆压力转化为作用在土颗粒上的有效应力,才能平衡地层土压力,维持开挖面的稳定[17]。

为确保开挖面稳定,泥水支护压力必须控制在一个合理的区间内。对于粘性土来说,泥水压力设定的上限为盾构切口的泥水劈裂压力;而对于砂性土来说,泥水压力设定的上限为渗透破坏压力。泥水压力设定的下限必须大于静水压力[18]。

3.1.1. 泥水支护压力上限

在软黏土地层中泥水盾构掘进时支护压力过大会导致在盾构切口处发生泥水劈裂现象,根据起裂压力确定黏土地层中泥水支护压力上限,表达式如下

$$P_{c\max} = P_f = \sigma'_3 \cdot (1 + \sin \varphi') + c' \cdot \cos \varphi' + u_0 \quad (1)$$

其中, σ'_3 为最小主应力有效值,以下式进行估算

$$\sigma'_3 = (\gamma' C + q) \cdot (1 - \sin \varphi') \quad (2)$$

在砂质地层中泥水盾构掘进主要考虑泥水渗滤过程,支护压力过大会导致砂土发生渗透破坏。因此为避免该类破坏的发生,泥水支护压力上限可以取为水流对砂土的临界渗透破坏压力[19],表达式如下

$$P_{c\max} = p_b = \gamma' C + \gamma_w h \quad (3)$$

其中, h 为计算点的水头高度, γ_w 为水的重度。

3.1.2. 泥水支护压力下限

支护压力过小会引起开挖面前方土体发生主动破坏失稳,涌入盾构泥水仓。选取楔形体理论作为支

护压力下限的参考[20]。考虑水下施工的泥水平衡盾构，掘进机所处地层为饱和地层，故选用有效应力原理，采用水土分算。模型中楔形体倾角为 $\alpha = \pi/4 + \varphi'/2$ ，仓筒宽度 $b = \sqrt{\pi} D/2$ ，仓筒长度 $l = D \cot \alpha$ 。水平方向和竖直方向的力学平衡条件分别表达如下

$$P + T \cos \alpha + 2T' \cos \alpha = N \sin \alpha \quad (4)$$

$$P_v + G = T \sin \alpha + 2T' \sin \alpha + N \cos \alpha \quad (5)$$

其中，

$$P_v = \sigma_v bl \quad (6)$$

$$\sigma_v = \frac{bl\gamma' - 2(b+l)c'}{2(b+l)K_0 \tan \varphi'} \left[1 - e^{\frac{-2(b+l)K_0 \tan \varphi'}{bl} C} \right] + q e^{\frac{-2(b+l)K_0 \tan \varphi'}{bl} C} \quad (7)$$

$$G = \frac{D^2}{2} b \gamma' \cot \alpha \quad (8)$$

$$T = \frac{c' b D}{\sin \alpha} + N \tan \varphi' \quad (9)$$

$$T' = \frac{D^2}{2} c' \cot \alpha + \frac{D^2}{2} K_0 \sigma'_z \cot \alpha \tan \varphi' \quad (10)$$

$$P = \left(P_{c \min} + \frac{\gamma_s D}{2} \right) b D \quad (11)$$

式中， q 为地面超载或换算上覆水体换算超载， K_0 为静止侧压力系数， σ'_z 为楔形体侧面的平均竖向应力，有

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (12)$$

$$\sigma'_z = \sigma_v + \frac{D \gamma'}{3} \quad (13)$$

综上，可以得出泥水支护压力下限表达式为

$$P_{c \min} = \frac{P_v + G - \left(\frac{bD}{\sin \alpha} c' + 2T' \right) (\sin \alpha + \varepsilon \cos \alpha)}{\varepsilon b D} + u_0 \quad (14)$$

式中，

$$\varepsilon = \frac{\tan \varphi' \sin \alpha + \cos \alpha}{\sin \alpha - \tan \varphi' \cos \alpha} \quad (15)$$

3.2. 珠海隧道工程典型断面泥水支护压力

珠海隧道工程沿线依次穿越粉砂、淤泥质粉质黏土(个别位置夹细中砂和粉质黏土)、淤泥质粉质黏土和砂质混合地层(砾砂、中粗砂和粉细砂混合地层)以及淤泥质粉质黏土和风化花岗岩混合地层。根据盾构沿线地质条件，将各地层做均一化处理，同时，为便于计算，选择四种地层进行泥浆支护压力上下限值的估算，即淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂和中粗砂四种地层。每种地层物理参数依据地勘报告取建议值，如表 3 所示。

计算时盾构掘进方向坐标以钻孔位置作为计算断面，并以里程标识。需要说明的是，盾构开始穿越粉砂地层较短，故人为增加一个计算断面，即 LK0+940.107。总共 45 个计算断面，各断面根据路线纵断面图确定隧道上覆土体和水体高度。根据 3.1.1 和 3.1.2 小节的泥水压力上下限值公式，可以获得如图 6 所示的支护压力上下限值。

Table 3. Physical parameters of stratigraphic soil
表 3. 地层土体物理参数

土层	天然密度/g/cm ³	孔隙比	粘聚力/kPa	内摩擦角/°	土粒比重
淤泥质粉质黏土	1.72	1.31	15.5	19.05	2.69
粉质黏土	1.89	0.901	18	10	2.71
粉砂	1.80	--	3	21	--
中粗砂	1.95	--	2	27	--

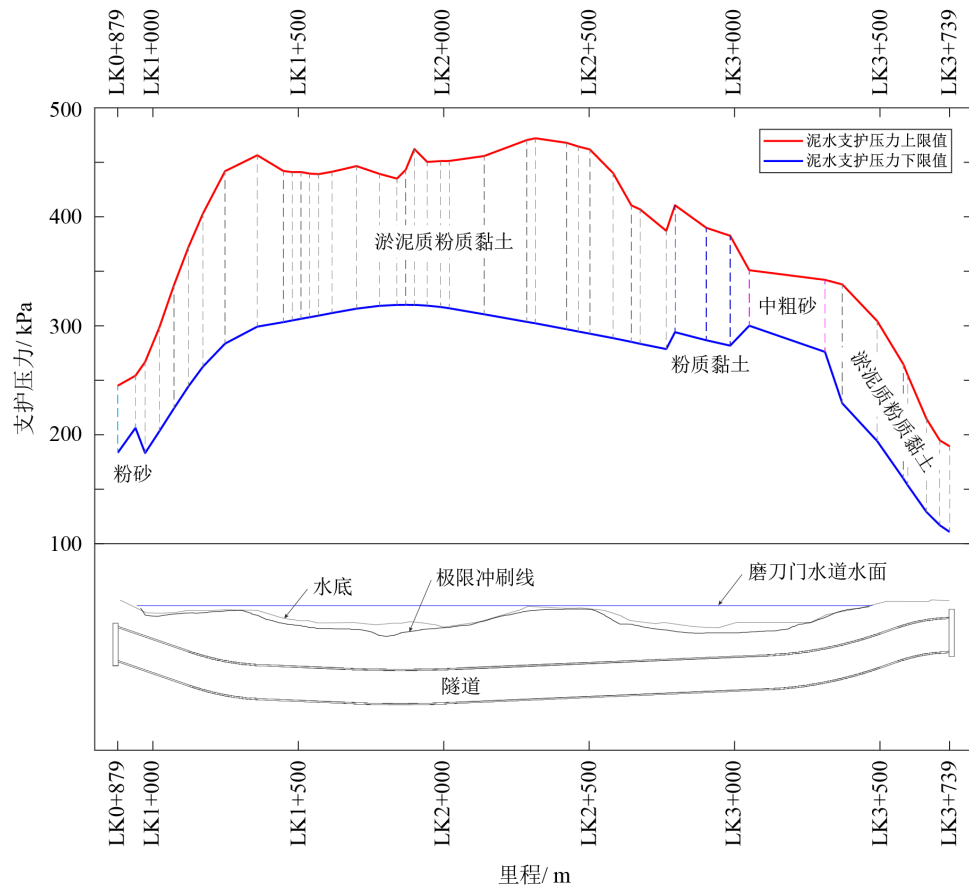


Figure 6. Upper and lower limit values for slurry support pressure in the left tunnel of Zhuhai Tunnel
图 6. 珠海隧道左线泥浆支护压力上下限值

盾构掘进刚开始的两个断面(LK0+879.187 和 LK0+940.107)穿越粉砂地层,上覆土体较浅,支护压力上下限值均较小。随着盾构向前掘进,进入淤泥质粉质黏土地层,隧道上覆土体和水体高度逐渐增加,从而最小和最大支护压力均增大。在 LK2+940.107、LK2+902.587 和 LK2+984.747 三个断面,盾构遇到粉质黏土,泥水支护压力略微减小。随后进入中粗砂地层,断面为 LK3+050.387 和 LK3+310.747,泥水支护压力上限值降低而下限值增大。之后,盾构开始抬头向上掘进,上覆土体和水体高度逐渐降低,泥水压力限值也随之降低。

综合来看,水下泥水平衡盾构掘进过程中所需的泥水支护压力上下限值和上覆土体、水体深度呈现大致正相关关系;相对黏土地层,砂质地层中的泥水支护压力上限较低而下限较高,特征区间较小,说明掘进至砂质地层中对支护压力的操作空间将更小,需严格控制支护压力。珠海隧道工程整体来讲上覆

土体高度较低,覆径比最大为 1.64,而最小仅为 0.52。掘进初始、结束和水中上覆土体较低的位置,泥水支护压力较小。盾构在水下较平稳段掘进过程中泥水支护上下限值基本保持不变,其中上限值在 450 kPa、下限值在 300 kPa 左右。

根据泥膜形成规律和泥浆劈裂成因的分析,在淤泥质粉质黏土或黏土地层掘进时,可以适当调高泥水支护压力接近支护压力上限值,这样可以保证较高的开挖面支护压力,利于泥浆向前渗透,也可以一定程度上提升掘进速率。当在砂质地层中掘进时,由于泥水支护压力上下限值较黏土为接近,可操作区间较小。同时,为了保证泥浆不被劈裂,应适当调小泥水压力。在盾构掘进初始和结束阶段,上覆土体和水体深度变化较大,所需泥水支护压力变化较快,在施工时应密切关注泥水仓压力监测值,保证泥水压力始终落在上下限值之间。

4. 讨论

本文通过数值模拟与理论计算,对珠海隧道工程中大型泥水盾构在复杂软弱地层掘进的关键技术问题进行了研究。研究结果不仅揭示了该特定工程的变形规律与压力控制要求,也为类似工程提供了重要的参考。

4.1. 变形规律分析

研究表明隧道埋深与下卧土层特性是控制管片收敛变形和地表沉降的核心因素。在珠海隧道的四个典型断面中,S2 断面因其埋深大、下卧层软弱,呈现出最大的收敛变形(隧道外径的 2.7‰)与地表沉降(-2.91 cm)。尽管这些预测值仍在规范允许范围内,但其变化规律与引言中提及的其他工程研究具有一定可比性。刘方等[3]对京张高铁清华园隧道的研究关注于浅覆土条件,这与本研究中埋深较浅的 S1 和 S4 断面情况类似。珠海隧道的模拟结果表明,在浅埋条件下,虽然地表沉降(-1.34 cm)小于深埋工况,但其沉降值与隧道埋深的比率仍然显著,这与浅埋隧道施工极易扰动地表的普遍认知相符。此外,苏凤阳等[5]和程烨等[6]关注的上软下硬复合地层,类似于 S4 断面的地质条件(上部为淤泥,下部为中风化花岗岩)。本研究发现 S4 断面的整体变形量并非最大,这表明对于变形控制而言,下卧层的软弱程度可能比地层的软硬不均构成更严峻的挑战。因此在评估类似工程风险时,除了关注常见的上软下硬地层,还需警惕深埋隧道下方是否存在软弱土层。

4.2. 支护压力控制

研究表明泥水支护压力的安全区间不仅随覆土厚度增加而整体升高,更受到地层性质的显著影响。尤其是在砂性地层中,由于其上限(渗透破坏压力)较低而下限(主动破坏压力)较高,导致可操作的压力窗口远窄于黏性地层。因此施工中必须采取更为精细化的动态控制措施,以确保开挖面的稳定并防止泥浆劈裂或渗透破坏。例如,在进入砂性地层前预先调整泥浆参数,适当提高泥浆的黏度和密度,增加优质膨润土的含量,以快速形成一层低渗透性的泥膜;或者预先调节盾构掘进参数,适当降低盾构的掘进速度,为泥膜的稳定形成提供充足时间。与此同时,应该加强对泥水仓压力的实时监测,确保压力始终维持在安全区间内。

综上所述,本研究不仅量化了珠海隧道工程在特定地层条件下的变形与压力特征,更通过与既有研究的对比,深化了对大型泥水盾构施工共性问题的理解。提出的针对性施工控制建议可直接用于指导现场作业,确保了实际工程的安全与高效。

参考文献

- [1] 刘良忠,柳新华. 国内外跨海通道的比较及启示[J]. 科技导报,2016,34(21): 16-26.

-
- [2] 朱伟, 钱勇进, 闵凡路, 王璐, 王超, 徐超, 胡润楠. 中国泥水盾构使用现状及若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 724-735.
- [3] 刘方, 崔建, 徐汪豪, 高峰. 大直径泥水平衡盾构浅覆土始发地表沉降特性[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 36-40+69.
- [4] 韩先才, 刘浩, 刘泽洪, 袁骏, 陆东升, 陈俊伟. 大直径泥水盾构穿越江堤的地表变形分析和控制研究[J]. 电力勘测设计, 2020(8): 49-55.
- [5] 苏凤阳, 朱建才, 李东泰, 董毓庆, 丁智, 陈乐华. 上软下硬地层大直径泥水盾构施工土体变形研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2675-2681.
- [6] 程烨, 施静康, 张东明, 黄宏伟. 复合地层中超大直径泥水盾构掘进引起地表沉降的 3D 数值模拟分析[J]. 中国市政工程, 2022(4): 55-58+123-124.
- [7] 赫明胜. 大直径泥水盾构地表沉降 Tie 约束模型数值模拟研究[J]. 建筑机械化, 2025, 46(4): 132-136.
- [8] 聂善军, 易领兵, 张鹏. 大直径泥水盾构穿越上软下硬地层施工影响研究[J]. 建筑机械, 2025(6): 160-165+172.
- [9] 李志义, 刘颖彬, 钟铎炜, 滕政伟, 蒋思豪, 孙亦厚. 浅覆土超大泥水盾构推进与停机引起地表及深层土体联动变形实测分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(13): 108-115.
- [10] 张亚峰, 王进尚, 刘应然, 龚剑, 刘玉卫. 砂土地层泥水盾构开挖面失稳机理[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 79-88.
- [11] 刘继强, 陈晓庆, 张晓东, 乔亚飞. 复杂地层妈湾海底大直径泥水盾构隧道掌子面稳定性数值分析研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S1): 19-27.
- [12] 沈津津, 曾小东, 姜旭, 秦绍坤, 徐永晖, 苏亚. 泥水盾构穿越上软下硬地层泥膜保压及开挖面稳定性研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(16): 34-37+46.
- [13] 吕乾乾, 苏文德, 周建军, 杨振兴, 孙飞祥. 海底复杂环境下泥水盾构掘削面稳定性研究[J]. 施工技术, 2021, 50(11): 103-107.
- [14] 陈仁朋, 李君, 陈云敏, 孔令刚. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 117-122.
- [15] 刘泉维, 杨忠年. 泥水平衡盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2255-2260.
- [16] 刘成, 孙钧, 杨平, 王海波. 泥膜形成与状态划分细观分析及模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 435-442.
- [17] 闵凡路, 魏代伟, 姜腾, 张春雷. 泥浆在地层中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2801-2806.
- [18] 刘学彦, 王复明, 袁大军, 方宏远, 张士龙. 泥水盾构支护压力设定范围及其影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 908-917.
- [19] 李广信, 周晓杰. 土的渗透破坏及其工程问题[J]. 工程勘察, 2004(5): 10-13+52.
- [20] 赵文, 程诚, 李慎刚, 徐行, 朱林. 盾构开挖面楔形体支护压力模型分析及改进[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 74-81+90.