

文章编号:1673-9469(2024)06-0087-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.013

考虑流-固耦合效应的盾构隧道下穿富水卵石地层稳定性分析

杨关飞¹,崔冠华^{2*},刘得第²,黄晓龙¹,罗虎¹,司纲¹

(1.中交二公局第四工程有限公司,河南 洛阳 471000;2.长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为探究砂卵石地层中管片的受力特性及其影响因素,基于某地铁隧道工程,通过FLAC^{3D}软件进行数值模拟,并结合现场施工监测数据,对盾构开挖过程中地表位移、地层变形及管片应力变化进行了系统分析,研究了不同水头高度对隧道结构和周边地层的影响规律。结果表明,考虑流-固耦合效应较未考虑时,地表最终沉降量增加了49%,管片拱顶沉降量增加了61.3%,周边收敛量增加了51.45%,管片最大应力增大约37%,与现场监测数据对比,考虑耦合效应的数值模拟结果更接近实际工程;水头高程与管片拱顶沉降及周边收敛呈正相关,与拱底隆起呈负相关;管片弯矩与水头高程呈正相关,最大正弯矩出现在拱腰处;管片轴力分布呈对称性,各部位轴力拱腰>拱肩>拱脚>拱顶>拱底。盾构隧道穿越富水卵石地层时,流-固耦合作用对地层变形和隧道结构受力具有显著影响。

关键词:盾构隧道;流-固耦合;富水卵石地层;数值分析

中图分类号:TU455.43

文献标识码:A

Stability Analysis of Shield Tunnel Undercrossing Water-Rich Sandy Pebble Stratum Considering Fluid-Solid Coupling Effect

YANG Guanfei¹, CUI Guanhua^{2*}, LIU Dedi², HUANG Xiaolong¹, LUO Hu¹, SI Gang¹

(1. China Communications Second Public Bureau Fourth Engineering Co., Ltd., Luoyang, Henan 471000, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of segments in sand and cobble strata and their influencing factors, based on a subway tunnel project, numerical simulations were conducted using FLAC^{3D} software and combined with field construction monitoring data to systematically analyze the surface displacement, stratum deformation, and segment internal force changes during shield tunneling. The influence of different water head heights on the tunnel structure and surrounding stratum was studied. The results show that, compared with the case without considering the fluid-solid coupling effect, the final settlement of the surface increased by 49%, the crown settlement of the segment increased by 61.3%, the lateral convergence increased by 51.45%, the maximum stress of the segment increased by about 37%, and the numerical simulation results considering the coupling effect were closer to the actual engineering than the results when the coupling effect was ignored. The water head height is positively correlated with the crown settlement and lateral convergence and negatively correlated with the crown bulge. The bending moment of the segment is positively correlated with the water head height, and the maximum positive bending moment occurs at the crown waist. The axial force distribution is symmetrical, with the axial force at the crown waist being greater than that at the crown shoulder, crown foot, crown top, and crown base. The fluid-solid coupling effect has a significant impact on the deformation of

收稿日期:2023-11-28

基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBSF-511)

作者简介:杨关飞(1984-),男,陕西安康人,硕士,高级工程师,从事公路与桥梁工程相关工作。

*通信作者:崔冠华(2001-),男,山东潍坊人,博士研究生,从事岩土与隧道方面的研究。

the stratum and the bearing capacity of the tunnel structure when a shield tunnel passes through a water-rich sandy pebble stratum.

Key words: shield tunnel; fluid-solid coupling; water-rich sandy pebble stratum; numerical analysis

近年来,随着城市地铁建设的快速发展,地下交通网络逐步形成。为了满足城市规划的需要,地铁隧道不得不穿越河流、湖泊等复杂的富水地层。然而,与普通土工隧道相比,隧道穿越富水地层时不仅需要考虑土体的重力,还要考虑水-土耦合作用带来的施工难度和风险^[1]。大量学者对隧道穿越富水地层时岩土体应力场与渗流场的耦合作用进行了研究。王金安等^[2]和赵胤翔等^[3]探讨了水下盾构隧道施工过程中的流-固耦合效应,揭示了围岩应力场和渗流场的分布规律。许巧详等^[4]研究了南京地铁2号线盾构隧道河段粉质粘土层的三种施工方案,利用数值模型分析了渗流场的稳定性与演变规律。邵迅等^[5]和甄正等^[6]对盾构隧道下穿泥质砂岩地层的情况进行了模拟分析,结果表明考虑流-固耦合时隧道拱顶沉降较大,与实际工程更为符合。戴潇蕾^[7]结合长沙地铁2号线下穿浏阳河砂砾岩地层的现场实测数据,研究了渗流作用对围岩变形的影响。陈路海等^[8]对盾构隧道下穿迎泽湖砂质地层进行数值模拟分析,发现渗流作用导致后期固结沉降显著增加。Cheng等^[9]通过理论与模拟相结合的方法,探讨了温州地铁2号线隧道在流-固耦合作用下的结构变形特征,发现隧道拱顶和拱底承受较大的轴向力和位移,管片混凝土容易开裂、翘曲。

尽管对富水地层的渗流研究已有诸多成果,但多集中于土质地层,对于砂卵石地层的研究相对较少。砂卵石地层具有自稳性低、渗透系数高、粘聚力小、内摩擦角大等特点,对隧道施工和地质稳定性影响显著。因此,有必要对隧道穿越卵石

地层的流体-结构耦合行为进行深入探讨。本文以某地铁下穿富水卵石地层为工程背景,利用FLAC^{3D}软件进行流-固耦合分析,研究了地表沉降、地层位移及管片应力变化规律。在考虑耦合效应的前提下,对不同水压条件下隧道管片的变形响应规律进行进一步探究,以期为类似工程提供科学参考。

1 工程概况

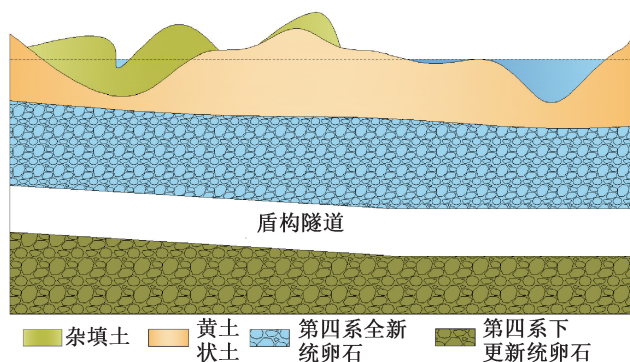
兰州地铁1号线海关—马滩区间,YDK13+841~YDK14+245区段下穿黄河,全长约404 m。该施工区域位于一个断陷盆地内,地下水位通常位于地表以下5~8 m。地层自上而下分别为第四系全新统杂填土(Q₄^{ml})、黄土状土、第四系全新统卵石、第四系下更新统卵石。地质剖面图和卵石、渣土的详细信息见图1。

采用泥水平衡盾构下穿第四系全新统和第四系下更新统砂卵石地层,卵石含量为55%~75%,颗粒级配不均,卵石粒径为20~50 mm,最大粒径650 mm,平均饱和抗压强度60~120 MPa,最大饱和抗压强度达200 MPa,土层渗透系数为 6.37×10^{-4} m/s,具体参数见表1。

2 数值模型建立

2.1 模型尺寸

隧道下穿富水段河床高差较大,最大埋深30 m,最小埋深15 m。为了减小边界条件约束带来的误差影响,模型长度和高度的选取应结合隧



(a) 地质剖面图



(b) 掘进渣土及卵石

图1 兰州地铁1号线海关—马滩区间地质情况

Fig. 1 Geological condition of Haiguan-Matan section of Lanzhou Metro Line 1

表 1 海关—马滩区间地层参数

Tab. 1 Geological parameters of Haiguan-Matan section

地层类别	密度 /(kg · m ⁻³)	弹性 模量/MPa	粘聚 力/kPa	内摩 擦角/(°)	孔隙 率/%	泊松比	渗透系数 /(m · d ⁻¹)	厚度 /m
第四系 全新统卵石	2 300	45	0	37	22.2	0.25	60	10
第四系 下更新统卵石	2 500	50	15	40	21.8	0.23	55	50

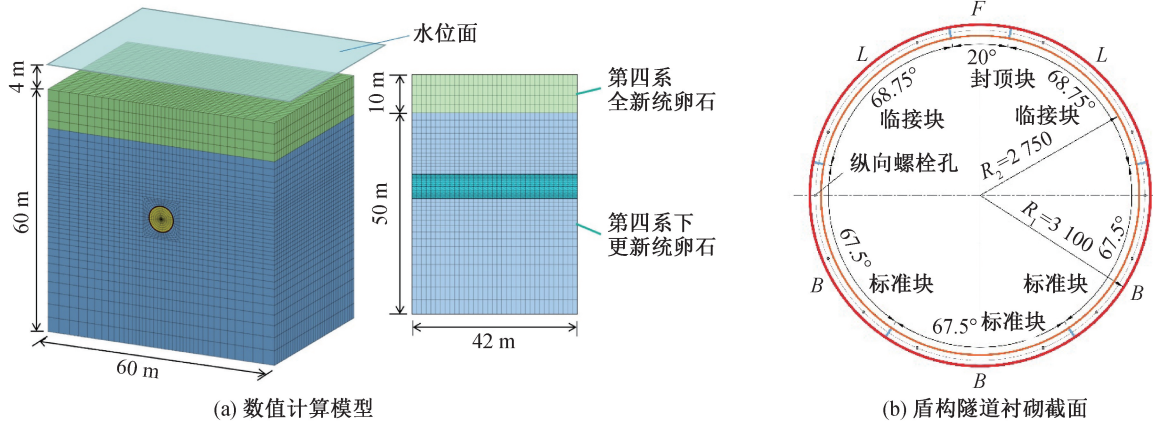


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation model

道外径的大小,故长:宽:高为 60:42:60,数值计算模型、盾构隧道截面如图 2 所示。

2.2 边界条件及材料参数

2.2.1 边界条件

为了考虑流固-耦合作用,在模型的边界处分别设置位移约束和不透水单元。孔隙水压力为静水压力,水压随深度呈梯度变化。考虑掌子面排水,将开挖面处的孔压设置为 0 kPa^[10]。管片内设置零水压边界,土体含水量饱和,水的渗流服从达西定律。

2.2.2 材料参数的选取

通过壁后注浆来控制孔隙引起的土体变形。注浆液与土体混合后形成混合体,建模过程中将其等效视为均匀的混合体层。混合体层的厚度取决于土体和注浆液本身的性质以及注浆压力。依据张云等^[11]根据大量资料得到的经验公式,取等效混合体层厚度为 1.0 m。同时为避免不适当的注浆压力导致地表下沉或地层劈裂,根据考虑劈裂压力的公式(1)及考虑覆土压力的公式(2)可以得出,注浆压力介于 0.35~0.69 MPa^[12-15]。故本模型注浆压力取 0.4 MPa,掘进压力取 500 kPa。

$$P_f = \gamma_t h + \alpha q_u \quad (1)$$

式中: P_f 为劈裂压力,MPa; γ_t 为土层容重,N/m³; h 为埋深,m; α 为浆液粘性和直径变化,本文取 0.02; q_u 为土的无侧限抗压强度,MPa,本文取 3 MPa。

$$P_e = \frac{\gamma D \cot\left(\frac{45^\circ + \varphi/2}{2}\right) - 2C}{2K_0 \tan\varphi} \left(1 - e^{-K_0 \frac{2H}{D \cot\left(\frac{45^\circ + \varphi/2}{2}\right) \tan\varphi}\right) + W_0 e^{-K_0 \frac{2H}{D \cot\left(\frac{45^\circ + \varphi/2}{2}\right) \tan\varphi} \quad (2)$$

式中: P_e 为上覆土压力,MPa; K_0 为静止土压力系数,本文取 0.28; γ 为土体容重,N/m³; D 盾构外径,m; H 为覆土深度,m; C 为粘聚力,kPa; φ 为土的摩擦角,(°); W_0 为地面荷载,kN/m²。

3 数值结果分析

3.1 位移场分析

图 3 为隧道地表沉降变化图,隧道两侧地表沉降先减小后趋于稳定。当不考虑耦合计算时,隧道两侧地表出现隆起,最大为 1.44 mm;当考虑耦合计算时,地表隆起消失,但出现不同程度的沉降。考虑渗流场-力场耦合时,地表最大沉降值为 8.82 mm,与未考虑耦合作用相比增加了约 49%,与现场监测的地表最大沉降较为接近。

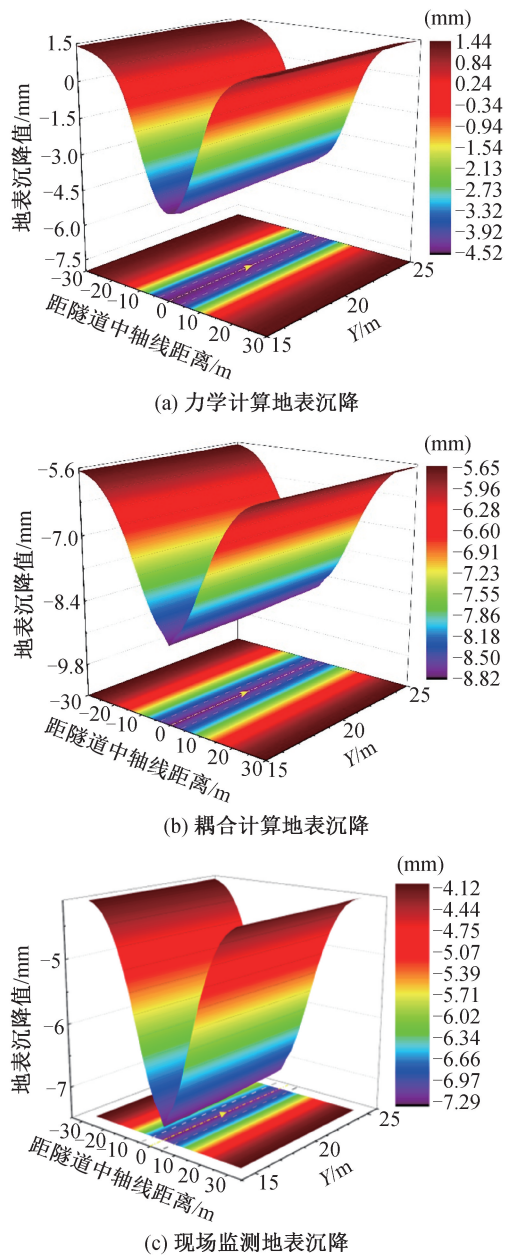


图3 不同情况下区间地表沉降变化图
Fig. 3 Land surface settlement variations in different intervals under different conditions

图4为隧道拱顶地层沉降变化曲线,通过力学计算和耦合计算的拱顶沉降与现场实测沉降规律整体相似。但与耦合计算、现场实测相比,力学计算的拱顶沉降先稳定后略有减缓。若考虑耦合计算,隧道拱顶的最终沉降由仅进行力学计算时的18.80 mm变为30.33 mm,沉降增加了61.3%。现场实测数据与耦合计算结果接近,符合实际情况。图5为管片周边收敛变化曲线,管片在开挖过程中趋近收敛,两种工况整体走势相同。当考虑耦合作用时,管片的周边收敛比仅考虑力学计算时高51.45%,沉降速度加快,更早趋于稳定。管片收敛

现场监测结果最大值为19.99 mm,比耦合状态下低2.6 mm。在盾构掘进过程中,土体应力场遭受破坏,导致隧道顶部土体卸荷并发生沉降,此沉降系应力场影响的产物。同时,掘进过程中的破坏引发了原有渗流场的变化,诱使地下水在压力水头的作用下向隧道方向迁移。这一过程导致孔隙水压力下降,从而引发土体进一步的固结沉降,该沉降是渗流场影响的结果。因此,考虑流固-耦合作用更切合实际工程情境。

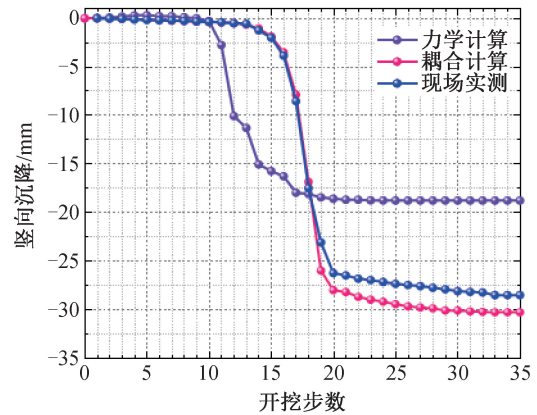


图4 拱顶累计沉降对比

Fig. 4 Comparison of cumulative settlement of arch

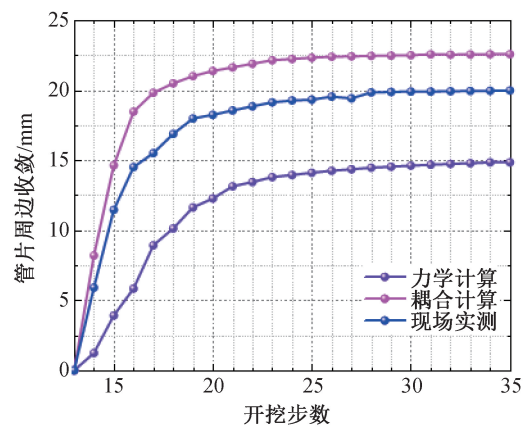


图5 管片周边收敛对比

Fig. 5 Comparison of convergence around tunnel segments

3.2 管片应力分析

提取隧道Y向20 m处断面上管片各位置的应力值,见表2。与现场实测值进行对比,如图6所示,耦合计算与力学计算的应力变化无明显差异,隧道右拱肩管片出现最大应力值9.99 MPa。与未考虑渗流相比,增大了约37%,与实际监测值相比增加了20%。考虑耦合作用时,最大主应力变化较大。说明隧道开挖后,地下水对最小主应力的影响相对较小,而对最大主应力的影响较为显著。耦合计算值更接近现场监测值,符合实际工况。

表 2 隧道 Y 向 20 m 处断面各部位应力值

Tab. 2 Stress values at various parts of the tunnel cross-section at the Y direction of 20 m from the entrance

测点	最大主应力/MPa		最小主应力/MPa		应力圆直径/MPa	
	力学计算	耦合计算	力学计算	耦合计算	力学计算	耦合计算
拱顶	1.77	2.50	0.05	-0.02	1.72	2.52
右拱肩	7.26	9.99	0.15	0.22	7.11	9.77
右拱腰	5.69	8.01	0.11	0.18	5.58	7.83
右拱脚	2.57	3.52	0.07	0.11	2.5	3.41
拱底	1.75	1.65	0.07	0.00	1.68	1.65
左拱脚	2.49	3.52	0.08	0.10	2.41	3.42
左拱腰	5.69	8.02	0.11	0.18	5.58	7.84
左拱肩	7.27	9.99	0.15	0.22	7.12	7.77

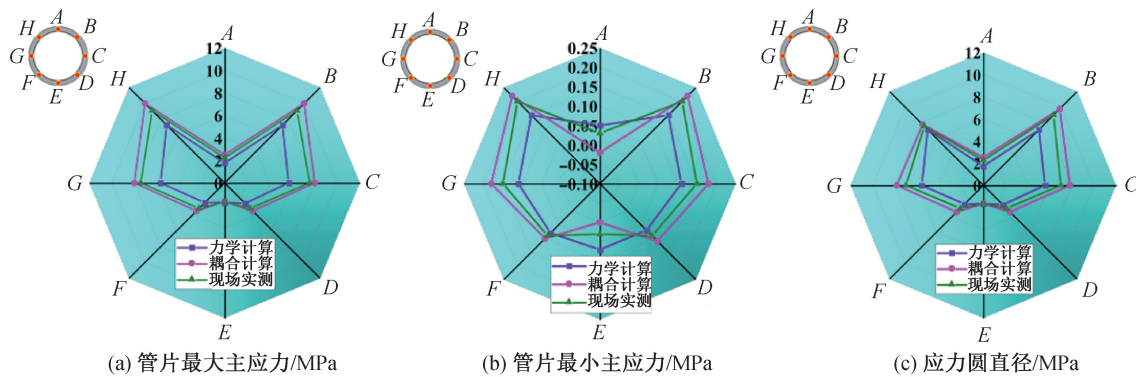


图 6 管片应力变形

Fig. 6 Stress and deformation of segment

在圆弧底部,应力圆沿 X 轴的负方向移动,更容易屈服,管片拱底也更容易被破坏。

4 下穿富水卵石地层影响因素模拟分析

受隧道下河床高程起伏的影响,地表覆盖层厚度和隧道上方水头压力变化较大。为了探究盾构穿越富水地层时不同水深对隧道结构的响应规律,我们通过 FLAC^{3D} 软件建立了不同水头高度下的隧道数值模型。

4.1 模拟工况组合

结合实际工程的覆土厚度和隧道上方水头高度进行工况组合,模型工况组合见表 3。

表 3 模型工况组合

Tab. 3 Combination of model operating conditions

研究内容	工况	隧道埋深 H/m	水深 D/m
水深	工况 1	25	2
	工况 2	25	4
	工况 3	25	6
	工况 4	25	8

4.2 模拟结果分析

4.2.1 管片竖直位移分析

隧道的拱顶和拱底在掘进方向 20 m 处的垂

直位移趋势如图 7 所示。拱顶部上部测点处围岩的最终竖向沉降分别为 26.78、29.88、30.85 和 32.64 mm,拱底部下部测点处围岩的最终隆起分别为 20.65、20.06、19.87 和 19.44 mm。因此,水头高度与拱顶竖向位移呈正相关,与拱底隆起呈负相关。当施工掌子面距监测断面较近时,拱底和拱顶变形幅度较大,当施工掌子面远离监测断面时,围岩受扰动变形较小,拱顶管片的最终变形分别为 10.81、13.45、13.63 和 14.01 mm;管片拱底隆起分别为 10.02、9.66、8.47 和 8.31 mm。

4.2.2 周边收敛分析

各工况管片周边收敛对比情况如图 8 所示,当水深较大时,在水头压力作用下管片周边收敛增大。不同水头高度下拱腰处周边收敛最大值分别为 35.18、39.32、42.45 和 45.75 mm。衬砌段施工后,土层受到横向位移的作用,衬砌段出现变形,其周边收敛分别为 19.96、22.59、24.55 和 26.12 mm。水头高度每增加 2 m,管片水平位移量相对于水头高度较小的上一个工况分别增加了 2.63、2.06 和 1.97 mm,而增长幅度有所放缓,分别为 13.18%、8.36% 和 7.99%。由此可知,水头高

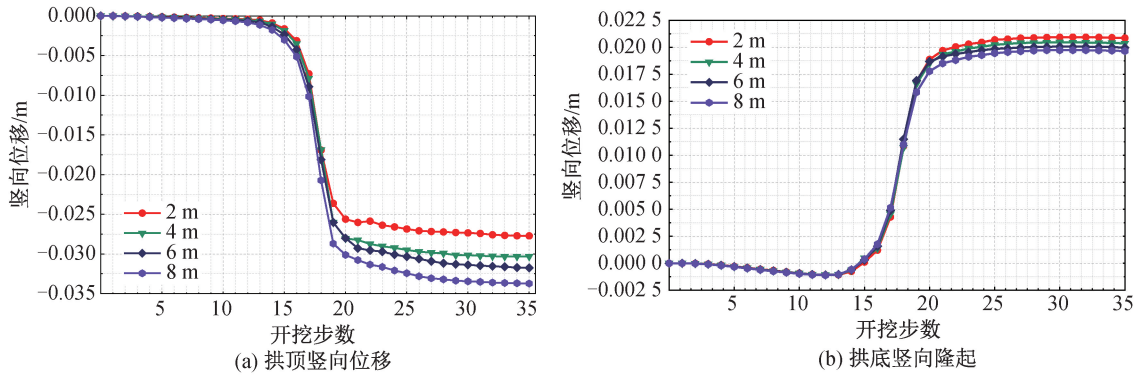


图7 不同水压管片竖向位移变化规律

Fig. 7 Variation of vertical displacement of pipe segments under different water pressures

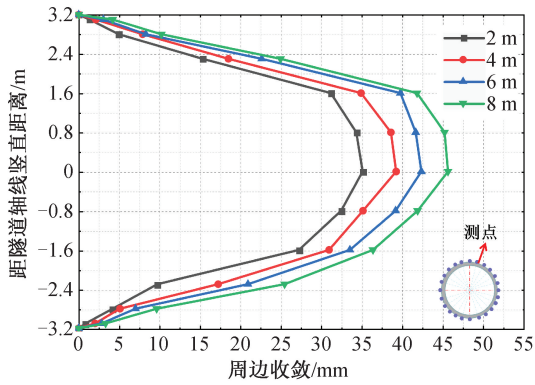


图8 各工况管片周边收敛对比

Fig. 8 Comparison of peripheral convergence of segments under different working conditions

度与管片周边收敛量呈正相关,与管片周边收敛增长速率呈负相关,即随着水头高度的增大,管片周边收敛量有所增大,而周边收敛增长幅度有所减小。

4.2.3 管片内力分析

不同水头高度下盾构管片弯矩分布如图9所示,盾构管片弯矩分布规律基本不受水头高度的影响。对比隧道各位置弯矩值发现,弯矩较大值出现在隧道拱腰,这表明管片外侧的压应力大于衬砌其他部位的压应力。结合弯矩云图对比分析,管片弯矩与水头压力呈正相关。

以水头 $D=6\text{ m}$ 为例,盾构管片环向轴力如图10所示,盾构开挖过程中,管片轴力为负值且对称

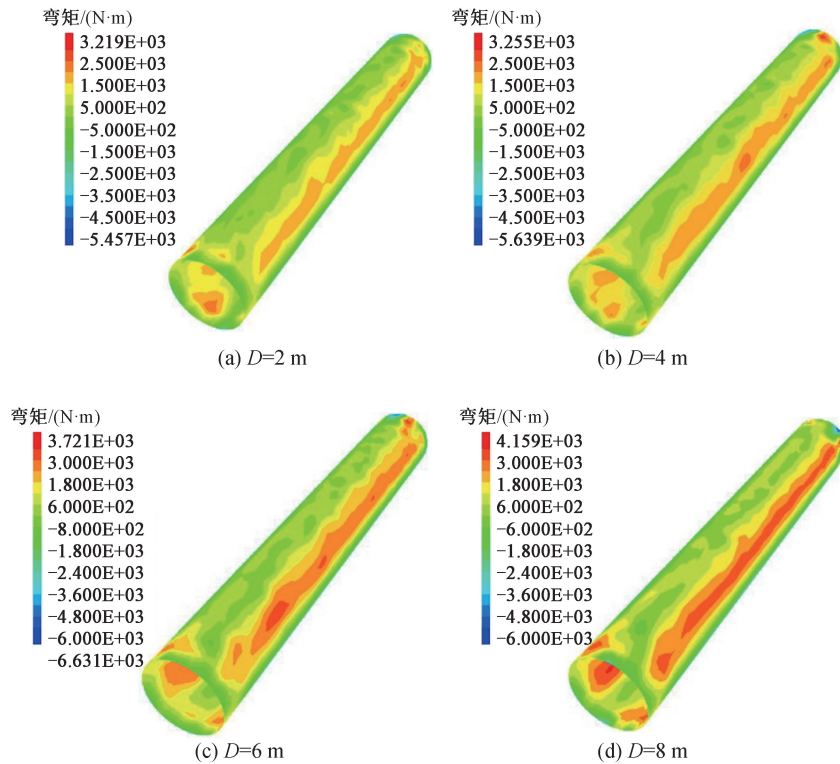


图9 不同水头高度下盾构管片弯矩分布

Fig. 9 Bending moment distribution of shield segment under different head heights

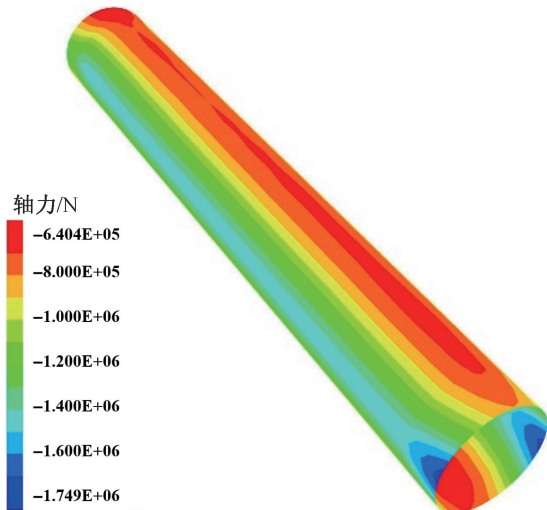


图 10 $D=6$ m 时盾构管片环向轴力
Fig. 10 Circumferential axial force of shield segment when $D=6$ m

分布,隧道整体受压,衬砌段管片拱腰处的轴力值最大。图 11 为不同水头高度盾构管片轴力值,由图 11 可知,各种工况下隧道各部位轴力的增长趋势不同,拱顶、拱腰和拱肩处的轴力与水头高度呈负相关,而拱底处轴力与水头高度呈正相关。

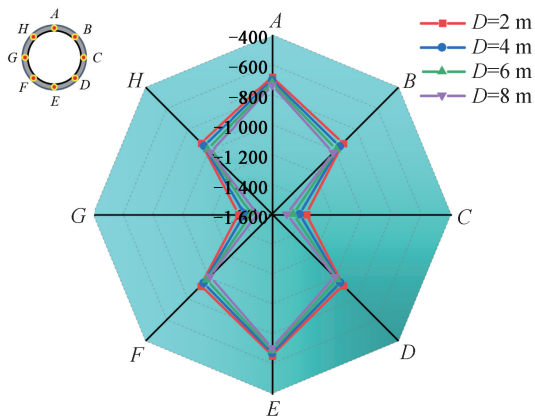


图 11 不同水头高度盾构管片轴力值(单位:kN)
Fig. 11 Axial force value of shield segment under different head heights(unit:kN)

5 结论

本文以兰州地铁 1 号线下穿富水卵石地层为研究背景,利用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟,结合现场施工监测数据,分析了地表沉降、地层位移及管片应力的变化规律,研究了不同水头高度对隧道结构和周边地层的影响规律,得出以下结论:

1) 在耦合作用下,地表最大沉降值为 8.82 mm,比未耦合时增加约 49%,与现场监测数据接近。在耦合作用下,管片拱顶沉降量增加了 61.3%,周边收敛增加约 51.45%,变形速率增大。

2) 拱顶沉降和周边收敛与水头高度呈正相关,但周边收敛的增加幅度较小。此外,拱底隆起与水头高度呈负相关。管片正、负弯矩值与水头高度呈正相关,正弯矩最大值出现在衬砌拱腰处。

3) 在设计和施工中,需要综合考虑水头高度和水深对隧道结构的影响。隧道周边收敛量随水头高度的增加而增加,但拱底隆起呈负相关,随水头高度增加而减小。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题—兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2162-2172.
- [2] 王金安, 周家兴, 李飞, 等. 大直径水下盾构隧道开挖流固耦合效应研究[J]. 人民长江, 2020, 51(9): 175-182.
- [3] 赵胤翔, 赵金昌, 郭治铁, 等. 富水粉细砂地层盾构施工引起地表沉降研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 918-924.
- [4] 许巧详, 刘斌, 金明, 等. 地铁隧道穿越江河地质稳定性及渗流特性数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2007(1): 62-65.
- [5] 邵迅, 姚华彦, 张振华, 等. 合肥地铁盾构隧道下穿河道施工数值模拟分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 95-100.
- [6] 甄正, 葛忻声, 张军. 基于流固耦合作用的太原砂卵石层盾构隧道变形特性分析[J]. 公路, 2021, 66(4): 361-367.
- [7] 戴潇蕾. 盾构下穿浏阳河围岩变形规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [8] 陈路海, 邵保平, 熊贵明, 等. 基于流固耦合作用的迎泽湖下盾构隧道稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 94-98.
- [9] CHENG X, ZHANG S, QI L, et al. Fluid-solid coupling response of shield tunnel lining structure under high water pressure [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2022, 40(10): 1151-1161.
- [10] 王军祥, 徐晨晖, 董建华, 等. 富水地层盾构管廊工程岩土体参数反演与掌子面稳定性分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 117-126.

(下转第 100 页)

- 板拱桥力学分析[J]. 世界桥梁, 2015, 43(3): 69-74.
- [5] 刘保东, 徐伟博, 徐道涵, 等. 圆形截面覆土波纹钢桥涵长期受力性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(3): 66-76.
- [6] 陈明奎, 张钰, 姚晓励, 等. 高山地区斜坡地形下波纹钢管明挖隧道力学特性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 290-298.
- [7] 徐群丽, 季文玉. 青藏线波纹管涵洞现场试验及理论分析[J]. 中国铁道科学, 2006(6): 55-59.
- [8] 贺文涛, 刘保东, 撤刚, 等. 波纹钢-混凝土组合结构在桥梁加固改造中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 104-111.
- [9] 褚夫蛟, 曾水生, 方文富, 等. 高填方大直径钢波纹管涵洞力学特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(9): 1338-1342.
- [10] 孙希波, 刘保东, 李春昊, 等. 方钢加强式波纹钢初期支护结构模型试验与数值模拟[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2058-2065.
- [11] 李百建, 符铎, 朱良生. 基于刚度等效的钢波纹板-减压板力学特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 131-139.
- [12] 王罡, 夏启龙, 王玉银, 等. 双层波纹钢混凝土组合拱静力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 358-364.
- [13] 刘保东, 李雨株, 王全录, 等. 大跨覆土波纹钢板拱桥结构加强措施研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 24-29.
- [14] 戚志河, 刘蕊, 陈玉珂, 等. 多孔波纹钢板拱涵的施工力学行为研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 132-140.
- [15] 李雨株. 大跨径覆土波纹钢板桥涵结构的受力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [16] 赵庆. 土石坝坝下涵洞三维有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第 93 页)

- [11] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388-392.
- [12] 杨成, 杨志团, 赖远明, 等. 兰州地铁下穿黄河段同步注浆参数控制研究[J]. 兰州交通大学学报, 2019(2): 15-19.
- [13] 徐成华, 谈金忠, 骆祖江, 等. 地铁盾构施工引发地面沉降三维流固全耦合数值模拟预测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 409-419.
- [14] 王忠凯, 徐光黎. 盾构掘进离开施工阶段对地表变形的影响范围及量化预测[J]. 岩土力学, 2020(1): 285-294.
- [15] 叶飞, 苟长飞, 毛家骅, 等. 黏土地层盾构隧道临界注浆压力计算及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015(4): 937-945.
- (责任编辑 周雪梅)