

越河盾构隧道开挖对复合地层 渗流场的影响作用研究

李 璋¹, 王自超¹, 邓国华², 王 强³

(1. 西安中铁轨道交通有限公司, 陕西 西安 710038;

2. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 越河盾构隧道掌子面通常存在较高的水头压力,使得土压平衡较难实现,且较大的渗透坡降也容易引起管涌、盾尾刷击穿等工程灾害。为探明隧道开挖对复合地层渗流场的影响作用,以西安地铁9号线下穿灞河段为例,采用有限元分析软件,选取典型复合地层开展多种开挖渗流条件下的稳态渗流分析,研究了盾构隧道开挖渗流条件下复合地层的总水头、渗透坡降和渗流速度等渗流场分布特征。结果显示,由隧道开挖渗流引起地层水头损失的大小及影响范围与开挖渗流速度的大小直接相关;开挖渗流速度越大,则地层水头损失越大,掌子面的水压随之减小;地层水头损失变化与渗流路径相关,由入渗面至出渗面沿渗流路径逐渐增大。研究表明,从一定程度上来看,开挖渗流速度越大,越有利于盾构机实现土压平衡条件,从而降低盾构机掘进的施工难度,不利的是此时地层渗透坡度变大,需要防止地层产生渗透破坏。

关键词: 越河盾构隧道; 渗流场; 水头压力; 水头损失; 数值模拟

中图分类号: U212

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0142—06

Influence of Shield Tunnel Excavation Across River on the Seepage Field of Mixed Ground

LI Zhang¹, WANG Zichao¹, DENG Guohua², WANG Qiang³

(1. Xi'an China Railway Transportations Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710038, China;

2. Xi'an Loess Underground Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: When shield tunnel is dug across river, the earth pressure balance of shield is difficult to achieve because of the higher hydraulic head pressure on tunnel face, and such engineering disasters as piping and the breakdown of shield tail brush are easy to be caused by the larger seepage gradient. In order to reveal the influence of tunnel digging on the seepage field of mixed ground, a series of steady seepage analysis under different digging seepage conditions are conducted by means of the finite element method software, on a typical mixed ground of Ba River passed by the ninth Xi'an Metro line. Accordingly, the changing law of total hydraulic head, seepage gradient and seepage velocity of mixed ground are analyzed. The analysis show that the head loss and its influenced field are directly relative to seepage velocity; the head loss become larger with the increase of seepage velocity, while the hydraulic head become smaller; and the magnitude of seepage head loss is related to seepage path, that become larger from seepage entrance to seepage exit. It can be concluded that the larger seepage velocity during tunnel digging is beneficial for the earth pressure balance of shield, thereby reducing the construction difficulty of shield tunnel excavation. Unfortunately, seepage gradient would increase, so that the seepage damage of layer need to be considered.

Keywords: river crossing shield tunnel; seepage field; hydraulic head; head loss; numerical simulation

近些年,随着我国城市建设进程的快速推进,大量城市地铁线路出现下穿海河的情况,如兰州地铁和济南地铁下穿黄河、南京地铁和武汉地铁下穿长江、广州地铁下穿珠江、长沙地铁下穿湘江等。目前,土压平衡和泥水平衡盾构法仍是下穿海河隧道开挖所采用的主要手段,下穿海河段富水地层中存在的高水头压力将为其带来多方面的施工技术难题,如开挖面失稳、盾尾刷击穿和地下水的喷涌等工程事故^[1-7]。

大量学者针对高水头压力下的盾构施工开展了系列研究工作,如朱自鹏^[8]通过有限元软件研究了高水压条件下盾构机螺旋输送机内的水压分布及渗流对地层的影响范围,并建议了渣土改良方案;曹利强等^[9]采用半承压水模型推导了盾构穿越层中沿盾构掘进方向水头分布的解析解,并将其与现有的二维渗流场解析解结合扩展为相应的三维解;邓如勇等^[10]、张淑朝等^[11]采用FLAC^{3D}软件模拟了兰州地铁1号线下穿黄河强透水砂卵石地层的盾构施工过程,并对潜在的施工风险进行了分析;宋曙光^[12]依托济南地铁采用多种手段研究了渗流作用下盾构隧道开挖面失稳破坏的灾变特性及防治技术;李振东^[13]、于跟社等^[14]、黄明琦^[15]、杨关青等^[16]、夏润河^[17]和炊鹏飞^[18]探讨了下穿河流砂卵石地层及富水地层的盾构施工技术。总地来看,针对高水头压力下隧道开挖面的稳定问题,相关科研及技术人员已开展大量工作,但就下穿河流盾构隧道开挖引起复合地层渗流场的影响作用方面则研究不多。

本文以西安地铁9号线下穿灞河段为例,选取其中最具典型性且盾构隧道穿越强透水砂卵石层的复合地层剖面,采用有限元渗流分析软件,开展了多种开挖渗流条件下的稳态渗流分析,研究了盾构隧道开挖渗流条件下复合地层的总水头、渗透坡降和渗流速度等渗流场分布特征,探讨了地铁隧道开挖渗流对地层水头损失及渗透破坏的影响作用,并针对越河盾构隧道穿越砂卵石底层等类似工程问题给出了施工技术措施及建议。

1 工程概况

西安地铁9号线盾构隧道下穿灞河段处于香王站—灞柳二路站区间,区间场地总体呈两端车站附近高,中间灞河区域地势低,线路底板埋深介于7.0 m~24.9 m之间,灞河段采用盾构法施工。

据工程勘察资料显示,区间隧道主要地层为:全新统人工填土(Q_4^{al})、冲洪积(Q_4^{al+pl})黄土状土、粉

质黏土、粗砂、圆砾土、卵石土,上更新统冲洪积(Q_3^{al+pl})粉质黏土、粗砂、圆砾土、卵石土和中更新统冲洪积(Q_2^{al+pl})粉质黏土、粉细砂、中粗砂、圆砾土、卵石土组成,如图1所示。灞河现河面宽度约60.0 m,河水深度约3.0 m,拟建盾构隧道与灞河河床底净距最小处约12.0 m,穿越地层主要为粉质黏土层、卵石土层及砂层,卵石土层和砂层均为强透水层,其中卵石土的渗透系数达80 m/d,且与灞河存在明显的地下水联通。

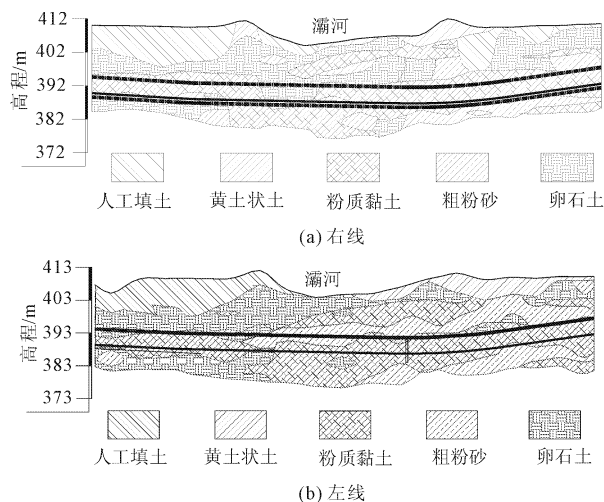


图1 西安地铁9号线穿越灞河盾构地质纵剖图

2 计算模型及工况

2.1 基本假定

针对复杂工程建立有限元模型,需要对实际工程进行一定程度的简化,以突出所研究的主要问题,并针对主要因素开展针对性分析,此处对计算模型进行了如下假定:

- (1) 不考虑各地层之间的起伏,假定各地层为水平均匀岩土体,各土体物理力学特性为各向同性。
- (2) 假定各岩土层的渗透特性具有各向同性。
- (3) 河床面保持常水头,不考虑水流的渗流耦合作用。
- (4) 仅对各地层作渗流分析,不考虑渗透力的耦合作用。

2.2 模型尺寸及边界条件

根据西安地铁9号线盾构隧道穿越灞河的地层资料及灞河河床的地形条件可知,盾构穿越灞河段主要地层为粉质黏土层、砂土层和卵石土层,其渗透系数分别为0.5 m/d、30.0 m/d和80.0 m/d。已有研究及工程实践表明,黏土的低渗透性使其在一定条件下通常被视为隔水层,因此,相对于卵石土和砂土地

层,低渗透性的粉质黏土层具有显著的隔水作用。

基于上述分析,本次计算选取代表性地层中的强透水组合地层(卵石土层和粗粉砂层)开展计算,有限元计算模型尺寸为:长 60 m(垂直与河道方向)、宽 40 m(平行与河道方向)、高 32 m(沿深度方向),自上而下依次为卵石土层和粗粉砂层,厚度分别为 13 m 和 18 m;灞河河床宽 34 m,河面宽 40 m,河深 3 m;盾构隧道垂直河床方向掘进,隧道直径 6 m,顶部距河床底埋深 12 m,有限元网格模型如图 2 所示。

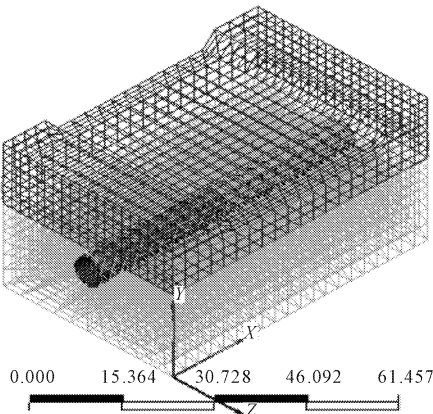


图 2 有限元网格模型

由于仅对模型进行渗流分析,不进行应力分析,因此无需施加位移边界条件,而仅需施加渗流边界条件。在模型的顶部和侧面设置为透水边界,河床面设置为恒定的水头边界,隧道管片边界为不透水边界,在盾构掘进面处设置渗流面。

2.3 模型参数

由于仅对模型进行渗流分析,所以也只需输入地层的渗流参数。根据地铁 9 号线香王站—灞柳二路站区间详细勘察阶段的岩土工程勘察资料,模型各单元的计算参数如表 1 所示。

表 1 模型单元计算参数

土层、结构单元	单元类别	孔隙比	渗透系数 $\text{/(m} \cdot \text{d}^{-1}\text{)}$ $k_x = k_y = k_z$	非饱和特性
卵石土	实体	—	80	饱和
砂土	实体	0.587	30	饱和
管片	板	—	0	—

2.4 计算工况

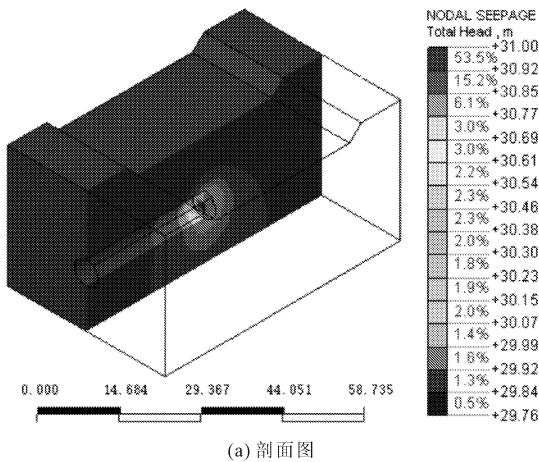
如前所述,本文旨在探明盾构隧道开挖渗流对强透水复合地层渗流场的影响作用,由此,本次分析计算选取同一种强透水复合地层结构(卵石土层 +

砂土层),而通过在隧道开挖面施加 4 种不同的渗流边界条件加以区分,记为工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4,分别对应的开挖面节点流量等于 $-1 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $-5 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $-10 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $-20 \text{ m}^3/\text{d}$,正负号表示渗流方向,负号表示由土体流出掌子面,正号则相反。在渗流计算中,通过将掌子面位置设置在河流正中下方,同时将河水深度设置为 3 m 的恒定值,用以模拟最不利情况。以此,通过改变掌子面的渗流速度,用以研究盾构机开挖渗流对复合地层渗流场的影响规律。

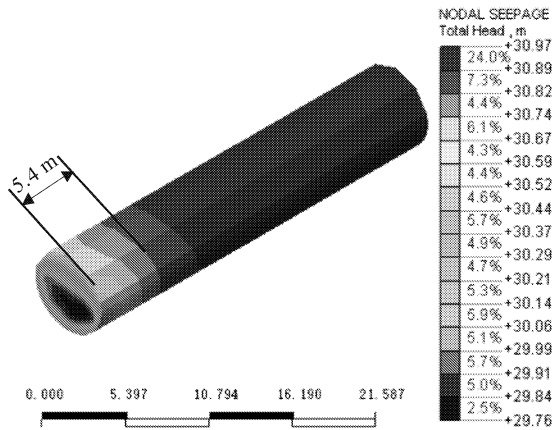
3 结果分析

3.1 盾构开挖渗流对地层水头损失的影响作用

图 3 给出了盾构隧道开挖渗流工况 2 引起地层水头损失的分布云图。



(a) 剖面图



(b) 待开挖土体

图 3 盾构开挖渗流时的地层总水头云图(工况 2)

由图 3(a)所示的剖面图可以看出,计算模型边界位置的总水头相对于开挖渗流前基本未变,仍保持接近于 31 m 的总水头。由此可见,当掌子面节点流量较小时,计算模型边界位置的水头基本未受到

盾构开挖渗流的影响,而在盾构隧道开挖掌子面渗流周围位置的总水头变小,出现了开挖渗流引发总水头损失的情况。由图 3(b)所示的未开挖土体总水头云图可见,水头损失最大位置出现在掌子面的中心偏下的位置,最大水头损失 1.24 m 左右,开挖掌子面渗流影响最大位置距开挖渗流面 5.4 m 左右。

与图 3 所示的地层水头损失相一致,图 4 分别给出了工况 2 地层剖面和掌子面渗透坡降的等值线图。由图 4(a)可见,盾构隧道开挖渗流作用下,地层的渗透坡降相对较大值主要出现在掌子面附近,而其它区域的渗透坡降值不大,与地层水头损失的分布规律一致。从图 4(b)还可以看出,该图中所示的渗透坡降云图呈现出一定的非对称性,这是由于有限元网格划分圆形区域的不对称造成的。然而,渗透坡降在掌子面的分布整体上是合理的,呈现出由上向下逐渐变大的分布规律,即渗透坡降的最大值位于掌子面的下侧位置,这也是隧道开挖过程中最易出现管涌破坏的位置。

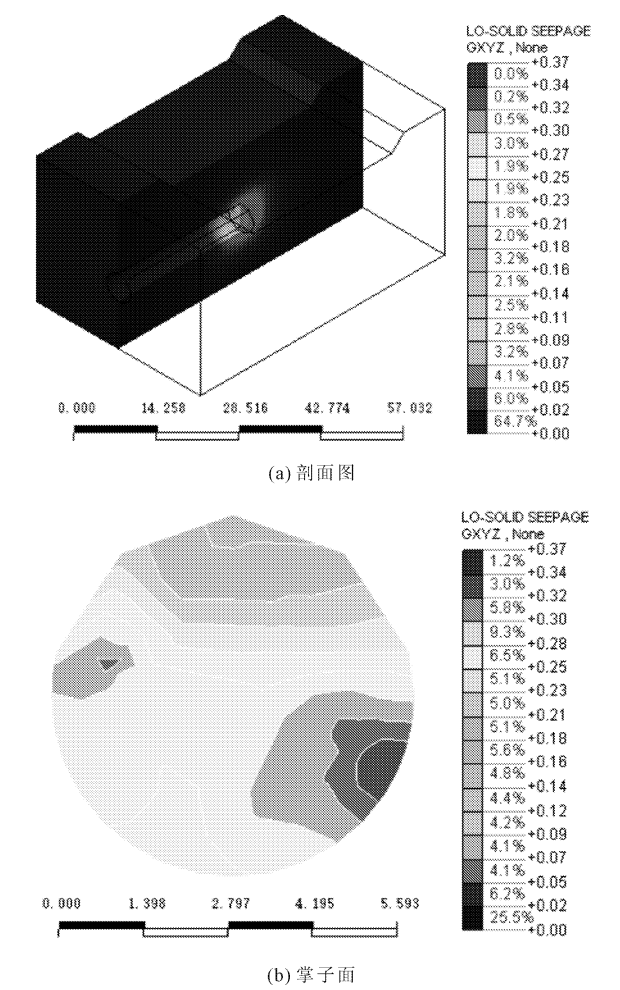


图 4 盾构开挖渗流时的地层渗透坡降云图(工况 2)

3.2 盾构开挖渗流作用下的地层渗流速度场特征

图 5 给出了盾构隧道开挖渗流条件下的地层渗流速度场。由图 5(a)可以看出,盾构隧道开挖渗流条件下,原有地层的水压平衡条件遭到破坏,河水沿河床底部垂直向下入渗,并随着入渗路径的发展而朝向掌子面。同时,朝向河床两侧の入渗路径也随着入渗路径的延伸,呈现出环形的渗流路径,且越靠近模型边界,其渗流路径越长。同时,渗流路径还呈现出以掌子面为中心的向心发射,即盾构开挖渗流时地层四周的水均流向开挖面。从图 5(b)还可以看出,渗流速度的等值线围绕掌子面呈环状形态,距离隧道掌子面越远,其渗流速度越小。

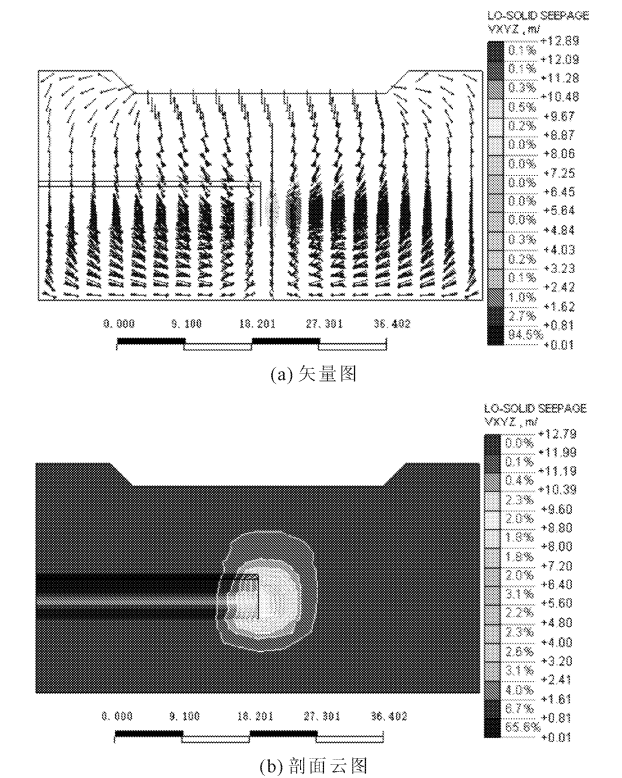


图 5 盾构开挖渗流时的地层渗流速度场(工况 2)

3.3 不同开挖渗流量条件下的地层渗流场变化规律

上述研究表明,盾构隧道开挖渗流条件下的地层水头损失主要产生在掌子面及待开挖土体部位。因此,图 6 分别列举了对应工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 的不同开挖渗流条件下待开挖土体的总水头云图。由图 6 可以看出,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 条件下掌子面对应的最大水头损失分别为 0.25 m、1.24 m、2.47 m 和 4.95 m。显然,地层的水头损失与隧道开挖面的渗流速度密切相关,渗流速度越大,对应的水头损失越大。从一定程度上来看,水头

损失越大,掌子面的水压越小,则越有利于盾构机实现土压平衡条件,从而降低盾构机掘进的施工工作难度。不利的是,渗流速度的增大,同时也代表渗透力的增大,这种情况下掌子面则容易发生渗透破坏,而不利施工安全。

通过比较 4 种工况条件下待开挖土体的渗流速度,沿盾构隧道掘进方向的渗流速度逐渐降低,最大渗流速度出现在掌子面位置。工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 条件下掌子面顶部位置的最大渗流速度分别为 2.57 m/d、12.80 m/d、25.70 m/d 和 53.10 m/d,渗流速度随着掌子面节点流量的增大而增大。与地层渗流速度分布规律相对应,沿盾构隧道掘进方向的水力坡降也逐渐降低,最大水力坡降出现在

掌子面位置。工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 条件下掌子面顶部位置的最大水力坡降 0.07、0.37、0.73、1.47,水力坡降随掌子面节点流量的变化规律与地层渗流速度的变化规律一致。

据经验公式估算,砂土的临界水力坡降为1.04,与上述计算工况中掌子面的最大水力坡降比较可见,工况 1、工况 2 和工况 3 的最大水力坡降 0.07、0.37、0.73 均小于砂土层掌子面的临界水力坡降 1.04,此时的渗透力不会产生砂土渗透破坏;而工况 4 的最大水力坡降为 1.47,则显然大于砂土层掌子面的临界水力坡降 1.04,在砂土层的掌子面位置则会出现渗透破坏,这种情况下掌子面则容易发生渗透破坏,而不利施工安全。

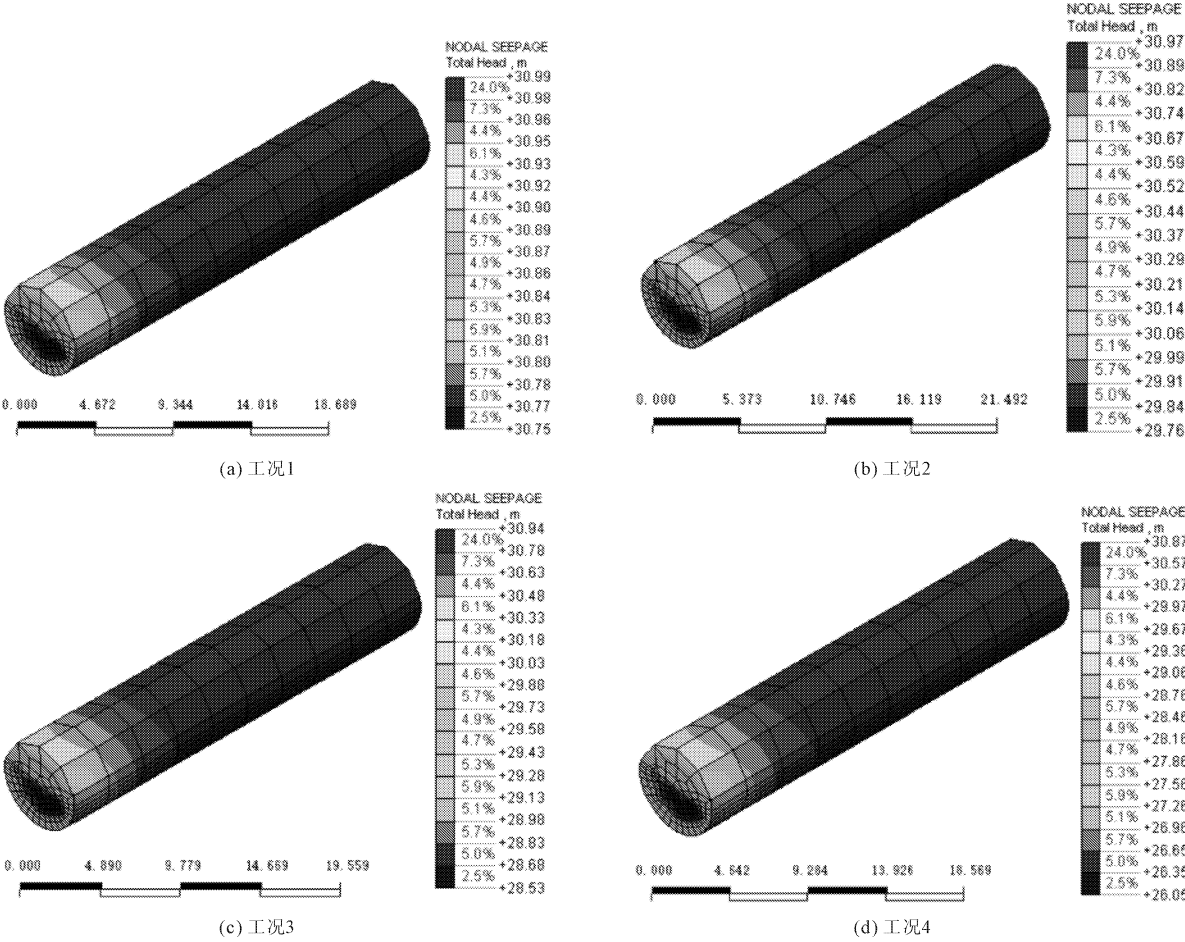


图 6 不同工况下待开挖土体的总水头云图

4 结论与讨论

(1) 地铁盾构开挖渗流引起的地层水头损失大小变化与渗流路径相关,地层水头损失大小由入渗面至出渗面沿渗流路径逐渐增大,最大的水头损失

出现在盾构开挖掌子面位置。地层的渗透坡降与地层水头损失的分布规律一致,渗透坡降的最大值出现在掌子面的下部,也是隧道开挖过程中最易出现管涌破坏的位置。

(2) 地铁开挖渗流引起的水头损失、渗透坡降

和渗流速度大小均随着开挖渗流量的增大而增大。较大的开挖渗流量产生较大的渗透坡降,渗流速度随之增大,相应地也会产生较大的水头损失。

(3) 从一定程度上来看,水头损失越大,掌子面的水压越小,则越有利于盾构机实现土压平衡条件,从而降低盾构机掘进的施工工作难度。不利的是,渗流速度的增大,同时也代表渗透力的增大,这种情况下掌子面则容易发生渗透破坏,而不利于施工安全。

(4) 地铁盾构机下穿河流砂卵石地层时,砂卵石地层的强透水性使得水头损失较小,隧道掌子面位置即存在较大的水头压力,容易发生螺旋机喷涌的情况,掘进难度较大。此时,可采用聚合物及膨润土的渣土改良技术,以增加渣土的塑性;螺旋机宜采用轴式叶片,以利于形成土塞;也可减小皮带输送机倾斜段的角度等改进措施。

参考文献:

- [1] 孙 谋,谭忠盛. 盾构发修建水下隧道的关键技术问题[J]. 中国工程科学,2009(7):18-23.
- [2] 李 达. 上软下硬富水地层盾构法施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2018(5):68-69,91.
- [3] 王德勇. 土压平衡盾构机过富水砂卵石地层施工技术[J]. 建设科技,2018(6):108-109.
- [4] 周沈华,田涌泉,陈鹤瑛,等. 复杂环境富水砂层土压平衡盾构机下穿灞河施工技术[J]. 智能城市,2021,7(3):148-150.
- [5] 陈鸿杰,魏 鑫. 土压平衡盾构机过富水砂层施工技术[J]. 城市轨道交通研究,2011,14(7):92-95.
- [6] 李卫华,张浩文,孔德骏. 富水砂性地层中地铁盾构下穿铁路施工引起的沉降分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(5):115-119,131.
- [7] 谢铁军,吕 涛,杨果林,等. 富水砂卵石地层 EPB 盾构衡盾泥辅助施工关键技术研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(5):74-79.
- [8] 朱自鹏. 砂卵石地层高水压条件下土压平衡盾构防喷涌研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [9] 曹利强,张顶立,房 倩,等. 泥水盾构泥浆在砂土地层中的渗透特性及对地层强度的影响[J]. 北京交通大学学报,2016,40(6):7-13,31.
- [10] 邓如勇,汪辉武,戴 兵,等. 兰州地铁1号线盾构下穿黄河强透水地层施工安全性研究[J]. 铁道建筑,2016(9):57-61.
- [11] 张淑朝,贺少辉,朱自鹏,等. 兰州富水砂卵石层土压平衡盾构渣土改良研究[J]. 岩土力学,2017,38(S2):279-286.
- [12] 宋曙光. 渗流作用下复合地层盾构隧道施工开挖面稳定性及控制研究[D]. 济南:山东大学,2016.
- [13] 李振东. 土压平衡盾构在砂卵石地层中穿越城市河流施工关键技术[J]. 隧道建设,2012,32(6):854-859.
- [14] 于跟社,王大海,郑鹏武. 土压平衡盾构在砂卵石地层长距离穿越河流施工关键技术[J]. 施工技术,2012,41(13):70-74.
- [15] 黄明琦. 复杂地质大断面海底隧道穿越富水砂层施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2016(6):23-26,31.
- [16] 杨关青,代 为. 土压平衡盾构机过江施工技术[J]. 隧道建设,2009,29(S1):26-31.
- [17] 夏润禾. 土压平衡盾构下穿河道段施工风险评估与控制措施研究[J]. 现代城市轨道交通,2020(2):58-64.
- [18] 炊鹏飞. 富水砂层区盾构下穿建(构)筑物风险控制技术研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):210-215,227.