

深厚圆砾土层深基坑截水帷幕深度对 紧邻地铁隧道变形研究

林煌超, 谢建斌, 陈彦昇, 张水兵, 马腾飞

(云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650500)

摘要:基于稳定渗流问题变分原理对深厚圆砾土层深基坑截水帷幕深度对紧邻地铁隧道变形影响进行理论研究。基坑截水帷幕长度很大程度上决定着基坑周边地下水渗流场形态,导致坑外孔隙水压力变化,进而改变土种应力并作用于隧道周围引起隧道受力和变形的不同。采用 MIDAS/GTS 大型三维有限元软件,分别考虑了截水帷幕深度为 15 m, 20 m, 25 m 时,隧道的变形特性并进行对比分析。结果表明,增加基坑截水帷幕深度可以有效地保护基坑周边地铁区间结构。

关键词:基坑开挖;盾构地铁;数值模拟;截水帷幕

中图分类号:U231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2018)04-0010-09

0 引言

在城市紧张的用地环境下,地铁车站出入口附近开挖基坑已不再少见。如何降低基坑工程对紧邻地铁隧道变形影响刻不容缓。基坑开挖前的降水使得坑内水位下落、孔压消散,导致有效应力增长,引发周边土层沉降及地铁结构产生竖直方向的变形。此外,降水会诱发地下水渗流,改变土体应力状态。变化的土体又反过来影响地下水渗流参数,导致孔隙水压力进一步变动。如此耦合作用,使作用在地铁结构上应力分布特征产生改变^[1]。所以基坑截水帷幕深度很大程度上决定着基坑周边地下水渗流场形态,导致坑外孔隙水压力变化,进而改变土种应力并作用于隧道周围引起隧道受力和变形不同。依据中国西南地区某深基坑紧邻运营地铁隧道工程实例,基于稳定渗流问题变分原理^[2],采用可以考虑土体卸载硬化的修正摩尔库伦模型,利用大型三维有限元软件 MIDAS/GTS 研究深厚圆砾土层深基坑截水帷幕不同深度情况下对紧邻隧道变形受力影响,对富含圆砾土层地区类似工程具有一定的参考价值和意义。

1 稳定渗流问题变分原理

在 MIDAS/GTS 中的土体模型是一种三向多孔介质并且具有可压缩性,适用于有效应力原理。基于 Darcy 定律,土中稳定渗流问题的偏微分方程的边值问题可表示为^[3]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = 0 \\ H(x, y, z) |_{\Gamma_1} = \varphi(x, y, z) \\ k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) + k_z \frac{\partial H}{\partial z} \cos(n, z) = q \end{cases} \quad (1)$$

式中, $H(x, y, z)$ 为水头函数; k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 主方向的渗透系数; W 为地下水入渗或蒸发量; Ω 为地下水渗流范围; q 为模型边界处单位面积内地下水交换量; n 为边界外法线方向。基于变分原理,上述

收稿日期:2017-07-22 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2018.04.02

基金项目:国家自然科学基金(51264937);云南省应用基础研究计划面上项目(2012FB117);云南省教育厅科学研究基金(2015Y197)

作者简介:林煌超(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail:996341679@qq.com

林煌超,谢建斌,陈彦昇,等.深厚圆砾土层深基坑截水帷幕深度对紧邻地铁隧道变形研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(4):10-18.

问题则可转化为求解泛函 $I(H)$ 的极值问题^[4],故有公式如下所示

$$I(H) = 0.5 \iiint_{\Omega} \left[k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - 2WH \right] dx dy dz - \iint_{\Gamma^2} qH d\Gamma \quad (2)$$

将整个渗流场范围划分为单元,故公式(2)可表示为

$$I(H) \approx \sum_e I^e(H) = \min \quad (3)$$

求解公式(3)极值需满足

$$\frac{\partial I(H)}{\partial H_i} = \sum_e \frac{\partial I^e(H)}{\partial H_i} = 0 \quad (4)$$

通过将每个子区域叠加,易得地下水渗流场的有限元法解答方程组

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (5)$$

式中, $[K]$ 为总体渗流矩阵,即单元渗流矩阵的组合; $\{Q\}$ 为自由项向量,是计算域里源量以及已给的边界流量对单元节点的作用; $\{H\}$ 为未知的节点水头向量。

综上所述,可通过计算泛函的极值的方法求解渗流微分方程定解问题。

2 工程概况

该深基坑邻近该城市地铁 2 号线出入口、地铁车站和地铁隧道。基坑拟建建筑为三层地下室,净用地面积约 6 090.71 m²,总建筑面积约 15 229.78 m²,场地整平标高为 1 894.40 m,地下室基底标高为 1 878.60 m(-15.80 m)。基坑规模长约 93 m,宽约 64 m,周长约 286.6 m,开挖面积约 5 295 m²,开挖深度约 14.90 m。

基坑东侧临近地铁 2 号线白云路站 1 号出入口,基坑边距离出入口结构支护桩 1.7 m,距白云路地铁 2 号线左线隧道约 30 m。三者都在基坑开挖的影响范围内,现场总平面图如图 1 所示。根据场地工程地质条件、四周环境条件和紧邻重要建(构)筑物深基坑工程施工经验,本工程采用地连墙同时作为截水帷幕,基坑完工后将地连墙用作地下室侧壁。地下连续墙墙厚 800 mm,深度为 25 m,竖向受力钢筋保护层厚度为 70 mm,墙幅宽度考虑施工单位机具设备、施工工艺及基坑相邻建(构)筑物与基坑的距离,基本墙幅采用 6.0 m、4.5 m,局部根据基坑形状适当调整。白云路地铁车站围护采用“地连墙+钢支撑”支护体系,墙厚 800 mm,冠梁尺寸 800 mm×1 200 mm,混凝土选用 C30,地连墙嵌固深度 16 m,主体结构为两层两跨钢筋混凝土框架结构,底板、中板和顶板厚度分别为 1 000、400 和 700 mm,主体结构混凝土选用 C35,框架柱为 700 mm×1 000 mm,混凝土强度等级为 C50。

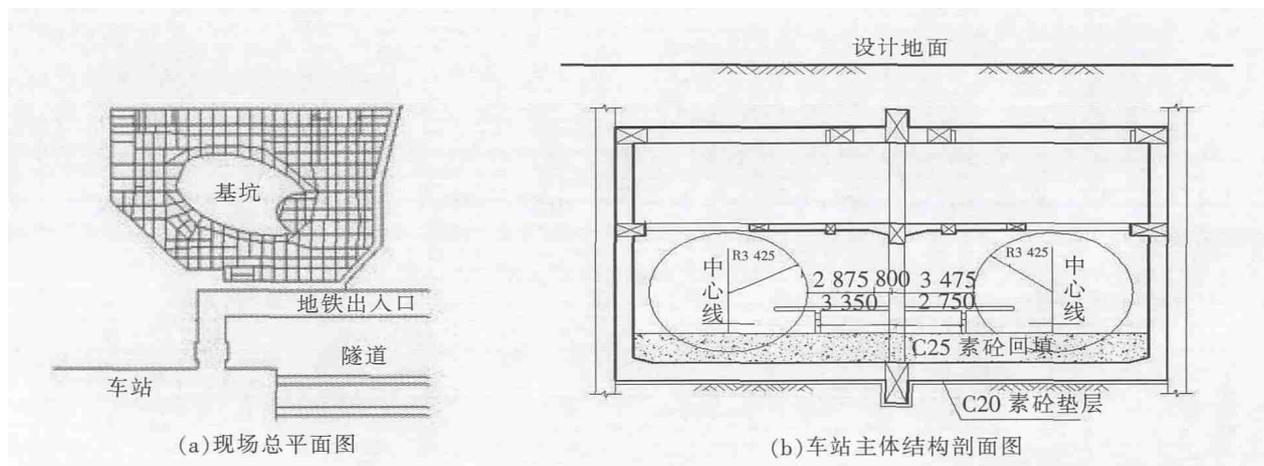


图 1 现场总平面图和车站主题结构剖面图(单位:mm)

基坑紧邻地铁侧土层为杂填土、黏土、粉质黏土、圆砾土层。上层软土具有中、高压缩性,强度稍低,土层厚度分布于 0.7~3.7 m 之间;下层圆砾土具有低压缩性,土体强度较高等有利因素,层厚在 2.4~

22.10 m 范围内,深基坑底部,地铁 2 号线出入口通道底部,地铁车站底部以及盾构隧道底部均位于该层。由于圆砾层透水性强,基坑开挖过程中因地下水位差而形成的渗流会对车站和盾构隧道结构产生不利影响。各土层物理力学性质如表 1 所示,其中带 * 参数为经验值。

表 1 各土层主要物理力学参数

层号	土层名称	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_{s12}/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	f_{ak}/kPa	$K_v/(10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
①	杂(素)填土	18.9	5.5	27.2	13.4	100	4.28
②	粉质黏土	18.7	4.7	34.1	10.2	150	27.1
② ₁	粉土	19.6	7.6	29.2	19.5	130	150
③	圆粒	20.5*	9.5*	8.5*	23.5*	240	10 000*
③ ₁	粉质黏土	18.5	4.0	39.0	14.5	150	13.6
④	圆砾	21.0*	10.0*	9*	25	250	10 000*
④ ₁	粉质黏土	19.0	5.8	45.0	13.8	170	10.1
④ ₂	黏土	19.5	6.55	26.5	19.2	160	79.5
⑤	圆砾	22.0*	10.0*	13.5*	10.0*	260	10 000*
⑤ ₁	粉砂	19.5	7.29	36.4	20.5	160	94.5

3 模型参数选取及模型建立

3.1 基坑模拟施工步骤

结合基坑工程实例,力求最大程度模拟实际施工情况,基坑开挖施工分为以下 9 个工况,具体如下:工况一,初始渗流场模拟;工况二,生成初始地应力场,平衡地应力;工况三,生成地铁区间结构(位移清零);工况四,施作地连墙,冠梁,基坑立柱和支护桩(位移清零);工况五,开挖至 -4.5 m,施作垫层,向上施作基坑顶梁、板;工况六,基坑降水至 -7.4 m,开挖至 -6.75 m,施作负一层垫层、楼板;工况七,基坑降水至 -11.15 m,开挖至 -10.65 m,施作负二层垫层、楼板;工况八,基坑降水至 -15.4 m,开挖至 -14.9 m,施作底板垫层、底板;工况九,坑内设置降水井,将水位降至 -18.4 m。

3.2 盾构隧道模型参数的选取

地铁出入口围护桩采用等效刚度法等效为连续结构板^[5],选择板单元模拟,车站主体结构楼板选择板单元模拟,车站框架柱选择梁单元模拟。对于车站和出入口内的支撑梁选择梁单元模拟,材料为 Q235b。地铁出入口围护桩采用自粘卷材防水层做防水处理,在建模过程中采用将围护桩等效为地连墙^[6]。对于盾构隧道管片结构采用等效刚度法模拟^[7-8],将管片材料本构模型取为线弹性横观各向同性模型,通过对横、纵向弹性模量分别折减来反映管片接头、管片环接头在荷载作用下,对紧邻隧道横向和纵向变形的影响。在前人研究的基础上^[9-10],考虑其横向刚度有效率为 75%,纵向刚度有效率为 20%,其参数见表 2。

表 2 盾构隧道模型参数

结构	横向刚度 E_h/GPa	纵向刚度 E_v/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
盾构隧道	25.875	6.9	0.2	2 600

3.3 三维有限元模型的建立

基坑三维模型按实际结构布置图建立有限元计算模型。用梁单元模拟楼板内的主梁和次梁,板采用板单元来模拟,梁板单元均按实际结构尺寸赋值。钢管混凝土立柱以及坑底桩采取线弹性梁单元模拟。其中钢管混凝土柱的弹性模量按截面等效原则计算,坑底桩的弹性模量和泊松比根据实际材料选取。地

连墙选取板单元模拟,并将其弹性模量进行折减 50%。

考虑到地铁区间结构体系的复杂性,地铁出入口、车站和隧道采用“wish-in-place”模拟方法^[6],即地铁区间结构采用“钝化”、“激活”功能一体生成,而忽略其具体开挖建造过程。基坑与地铁结构有限元模型如图 2 所示。建立基坑和邻近地铁结构整体模型时,在尊重实际的基础上对降水过程和地铁结构做了以下简化处理:①采用坑内降水方式,用坑内相应位置节点水头的“钝化”和“激活”模拟降水过程;②忽略周边土层降水入渗的影响,认为模型四周的总水头边界保持不变;③不考虑地铁结构与周围土体发生相对滑移,认为两者在基坑开挖过程中始终紧密接触。

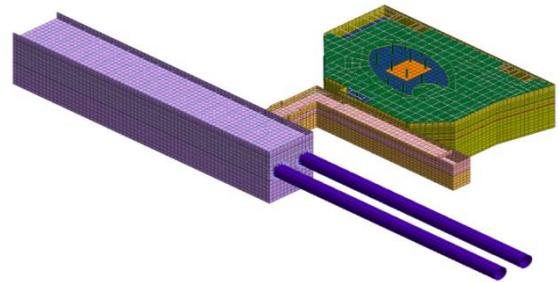


图 2 基坑与地铁区间三维模型图

4 结果分析与讨论

4.1 地铁隧道变形分析

地铁隧道属于长条形结构,易受基坑施工影响而变形。选取基坑降水和开挖关键步骤隧道位移云图如下:图 3 为基坑最后一次开挖和基坑最后一次降水的隧道位移云图,图 4 为基坑第一次开挖和基坑第一次降水的隧道位移云图。规定竖向变形(z 方向)以方向向上为正,横向变形(y 方向)以偏向基坑方向为正,横向变形(x 方向)规定向北为正。由图可知在基坑降水开挖初始阶段,由于车站右端部产生了竖向隆起带动了隧道近站段的隆起,但基坑第一步开挖支护对隧道影响很小,最大竖向隆起 0.2 mm,随着开挖的进行隧道整体发生沉降。

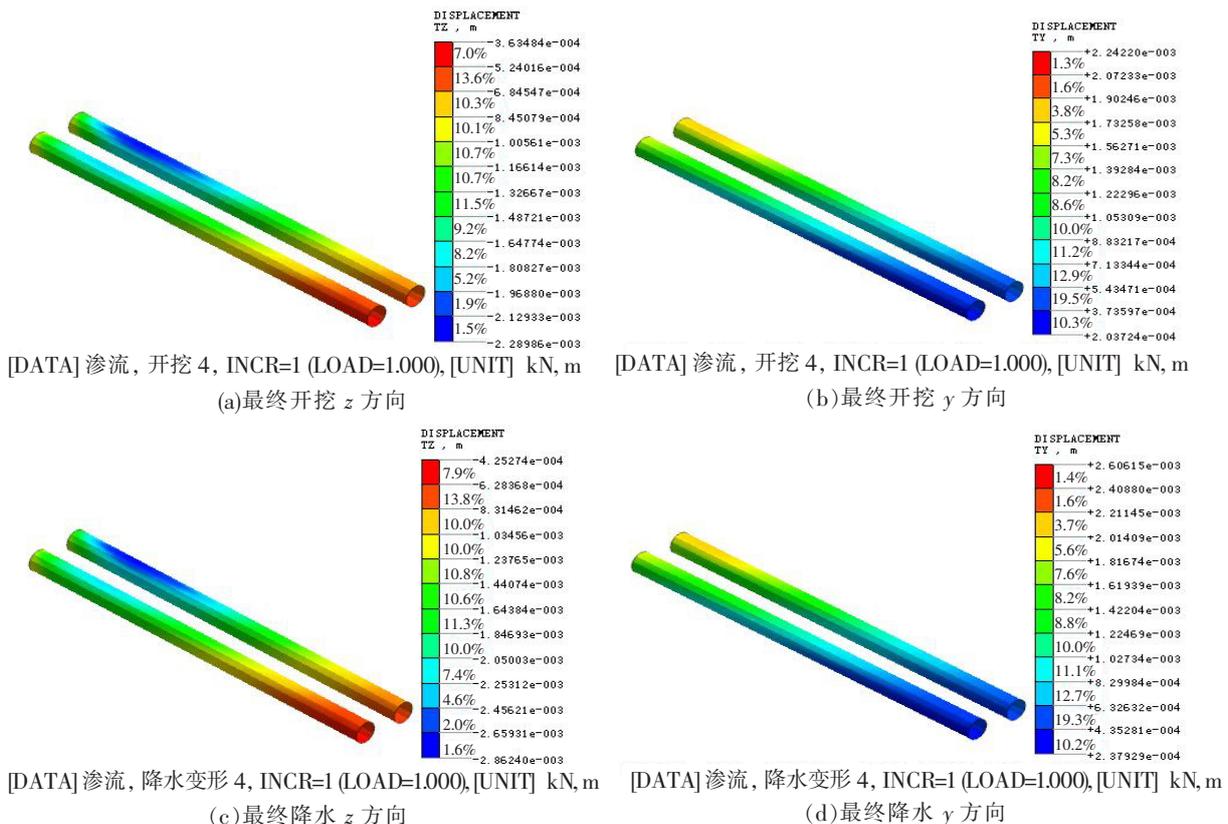


图 3 基坑最终开挖和最终降水隧道变形图

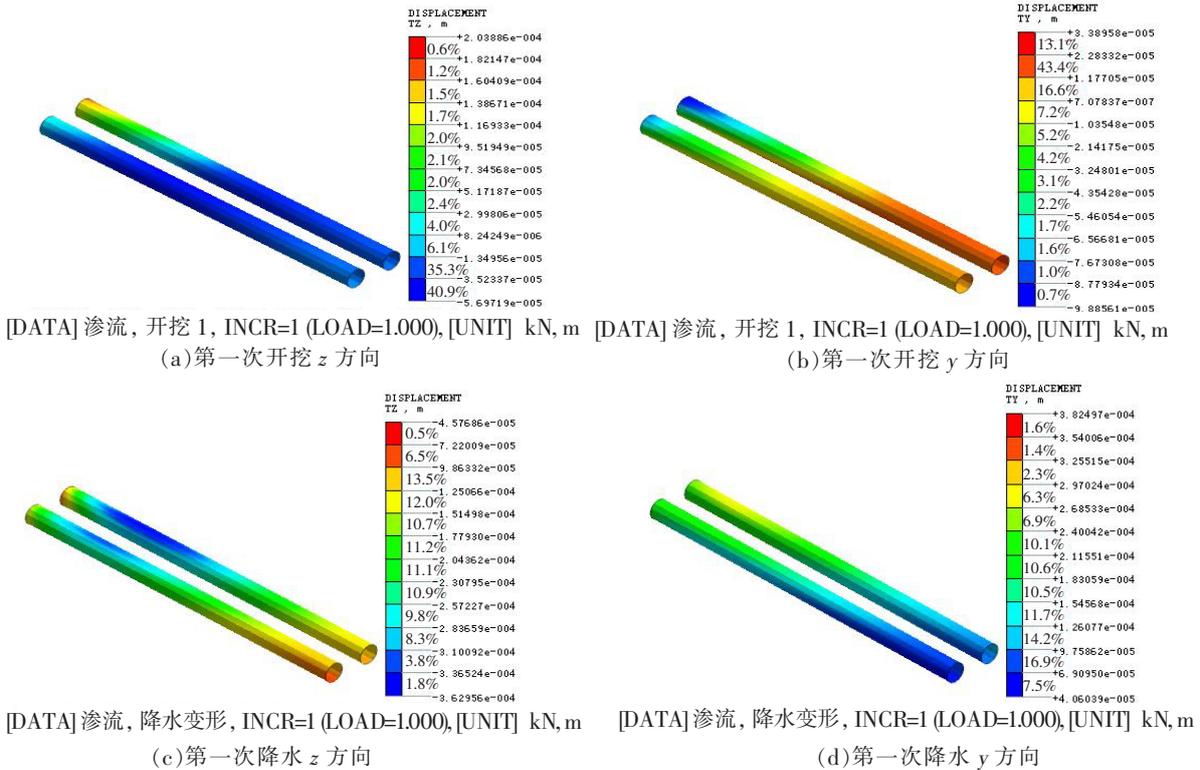


图 4 基坑第一次开挖和第一次降水隧道变形图

在该基坑开挖全过程中,左线隧道纵向沉降和水平位移如图 5 所示,观测位置分别为隧道拱顶和左拱腰。由图 5(a)可见由于隧道结构和车站的连接限制了隧道左端的变形,隧道最大沉降发生在距离隧道左端口 23 m 左右的位置,随着与基坑距离增加沉降逐渐减少。基坑开挖到底后,隧道最大沉降为一 2.3 mm。从总体上来看,隧道在竖直方向上产生下凹的 U 型变形,其沉降变形曲线类似三次曲线。而右线隧道相对基坑较远,降水开挖作用对其影响稍弱,其最终沉降只有左线隧道的 60%左右。

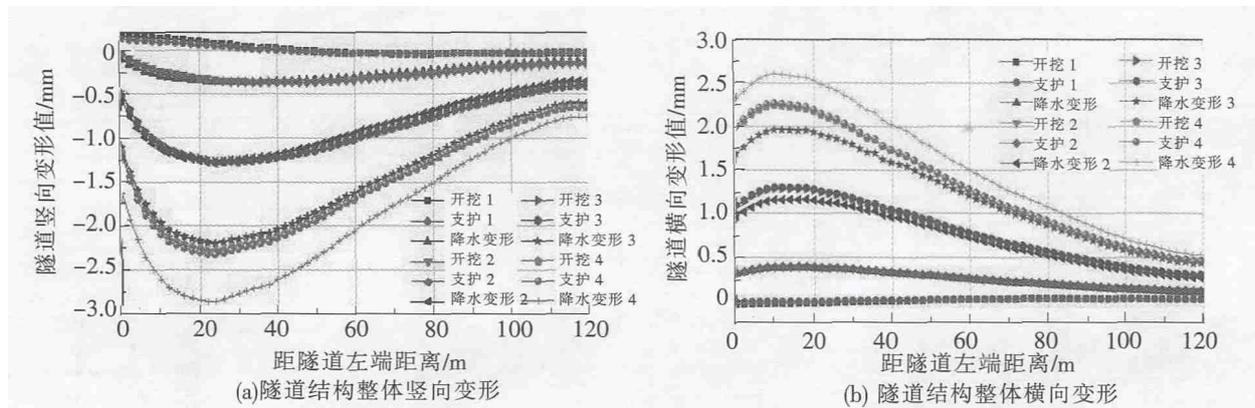


图 5 隧道结构整体竖向变形和横向变形

由图 5(b)可知在基坑施工初始阶段,隧道侧向位移很小,最大值只有-0.03 mm,偏离基坑方向。随着基坑施工,隧道整体向基坑方向偏移。同样由于隧道结构和车站的连接限制了隧道左端的变形,隧道最大侧向变形发生在距离隧道左端口 10 m 左右的位置。随着与基坑距离增加,隧道的侧向位移不断减少,基坑完成最终开挖后,隧道最大侧向位移为 2.24 mm,与隧道最大沉降相当。隧道的侧向变形同样类似 U 型趋势分布,其变形曲线类似三次曲线,可以对隧道横向变形做三次曲线拟合。右侧隧道距离基坑

较远,其最大侧向位移仅为左线变形值的 62.3%。

4.2 截水帷幕深度对地铁隧道影响分析

由于地铁区间隧道场地范围内存在深厚圆砾土层,相比于其它土层,其渗透系数大,透水性强,因而基坑降水会在隧道周边产生较大的渗流力,所以基坑截水帷幕深度对隧道造成的影响更大。为分析截水帷幕深度对地铁隧道变形影响情况,设置了 4 个监测断面,隧道具具体监测断面图和断面角度示意图如图 6 所示(A 端为左端近站端,D 端为右端远站端)。

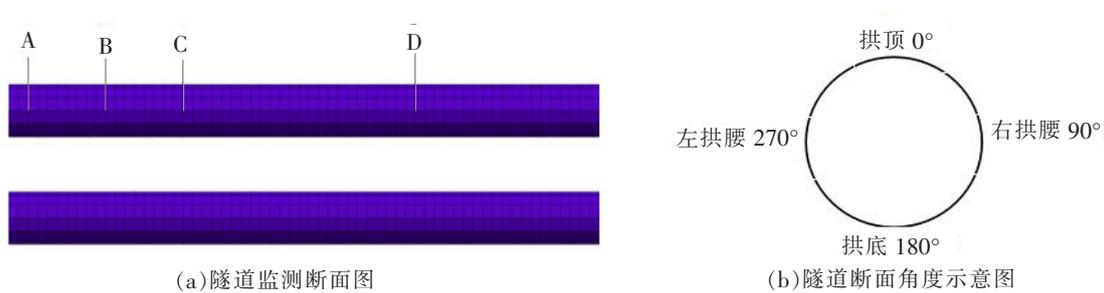


图 6 隧道监测断面图和隧道断面角度示意图

基坑截水帷幕长度很大程度上决定着基坑周边地下水渗流场形态,导致坑外孔隙水压力变化,进而改变土种应力并作用于隧道周围引起隧道受力和变形的不同。分别考虑了截水帷幕深度为 15 m, 20 m, 25 m 时隧道的变形特性并进行对比分析。由上文分析中可知,基坑施工对左线隧道结构的作用明显大于右线隧道,故下文仅取左线隧道截面 B 来研究隧道结构变形的差异。图 7(a)给出了左线隧道截面 B 在截水帷幕不同深度的条件下,最终降水时对应的周边孔隙水压力变化曲线图。由图可知,当截水帷幕深度降低,隧道周边孔隙水压力值也减少,两者表现为正相关关系,且断面各处孔压值呈现均匀减少趋势。原因在于增加截水帷幕深度使得地下水渗流路径变长,坑外地下水位受坑内水位降落的影响降低,即坑外水位受扰动程度减少,限制了土中孔隙水压力降低。因而根据有效应力原理,作用于隧道上的附加应力也随之降低。

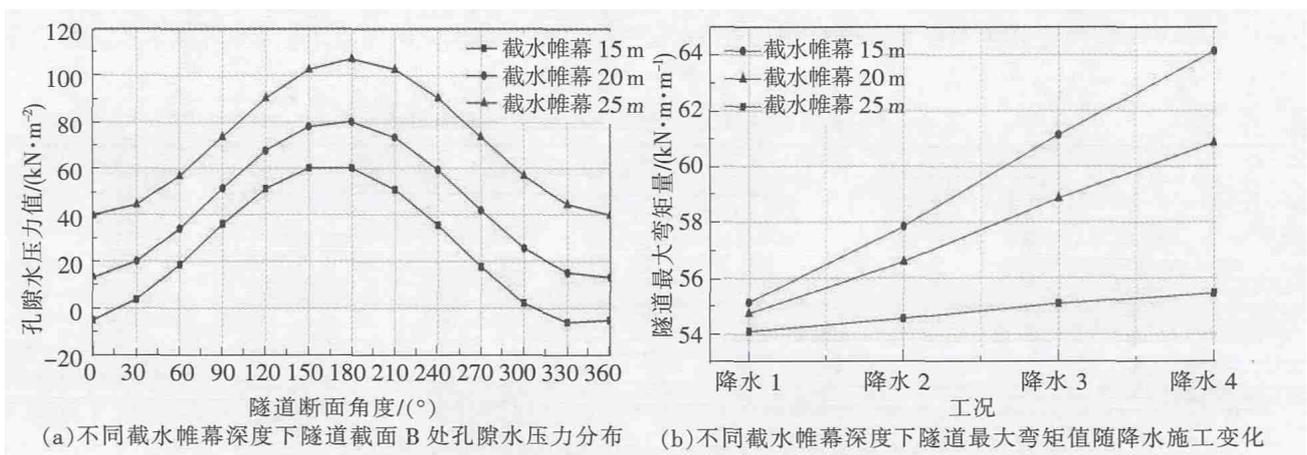


图 7 不同截水帷幕深度隧道孔隙水压力分布与弯矩值

图 7(b)为基坑降水开挖过程中,不同降水施工步时,左线隧道最大弯矩的变化情况。由图可知,左线隧道最大弯随基坑降水施工近似呈线性增加趋势。随着截水帷幕深度增加,弯矩变化线斜率不断降低,当截水帷幕深度为 25 m 时,隧道弯矩几乎不随降水进程而变化。图 8 为最后工况下不同截水帷幕深度时隧道断面 B 的变形情况,表 3 为断面 B 变形情况汇总表。

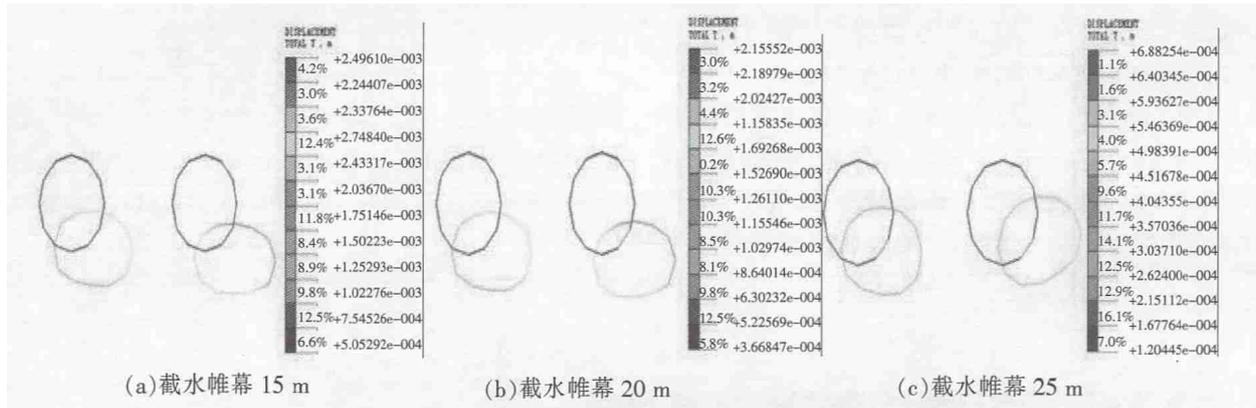


图 8 最后工况不同截水帷幕深度时隧道断面 B 的变形情况

表 3 不同截水帷幕深度下断面 B 最终变形汇总表

截水帷幕深度 /m	拱顶竖向位移 /mm	拱底竖向位移 /mm	竖向直径增量 /mm	左拱腰水平位移 /mm	右拱腰水平位移 /mm	水平直径增量 /mm
15	-2.818	-1.679	-1.138	2.500	1.389	1.106
20	-1.786	-1.058	-0.728	1.788	1.062	0.725
25	-0.246	-0.086	-0.159	0.570	0.386	0.184

从图 8 可以看出,基坑施工造成隧道断面偏向基坑方向的“横鸭蛋”式变形。当截水帷幕深度增加,截面 B 的最大变形量降低,当截水帷幕深度为 15 m 时,截面 B 最大变形量为 3.5 mm,而当截水帷幕深度为 25 m 时,截面 B 最大变形量只有 0.68 mm。其中截水帷幕为 25 m 时,隧道截面向斜下方变形的趋势已不明显,此时隧道的横向变形大于隧道沉降,隧道主要受基坑开挖导致的侧向卸载作用,而降水引发的沉降可忽略。由表 3 可见,随着截水帷幕深度增加,断面 B 变形各关键指标均呈负相关趋势,其中当截水帷幕深度由 15 m 增加到 20 m 时,断面变形各关键指标降低幅度为 35%左右,当截水帷幕深度由 20 m 增加到 25 m 时,断面变形各关键指标降低幅度在 80%左右。图 9 为基坑最终降水时,不同截水帷幕深度条件下,左线隧道纵向变形。表 4 为不同截水帷幕深度下隧道变形情况。

表 4 不同截水帷幕深度下,隧道最大变形与最小曲率半径

截水帷幕深度/m	最大竖向位移/mm	竖向最小曲率半径/m	最大水平位移/mm	水平向最小曲率半径/m
15	-2.84	130 000	2.70	82 000
20	-1.81	133 000	1.87	97 000
25	-0.27	316 000	0.68	294 000

从图 9 可以看出,随着截水帷幕深度增加,左线隧道沉降和横向变形都降低,隧道的竖向直径增量和水平直径增量也不断降低,隧道弯曲变形趋势减弱。受地铁车站影响,隧道沿纵向变形均先增大后降低,最大沉降变形在距离隧道左端 20~40 m 的范围内,隧道的最大水平位移在距离隧道左端 0~20 m 的范围内,车站对隧道的横向变形的制约作用小于对隧道竖向变形的作用。隧道的横向变形和竖向变形在基坑降水开挖过程中总体变形趋势和量值相似。从表 4 可见,增加截水帷幕深度可有效降低隧道变形,当截水帷幕深度为 25 m 时,隧道最大竖向变形只有 0.27 mm,最大水平位移只有 0.68 mm,相比于 15 m 的截水帷幕,降低幅度分别达 90%和 75%。随着截水帷幕深度增大,隧道最小曲率半径随之增大,而隧道纵向弯曲程度随之降低。

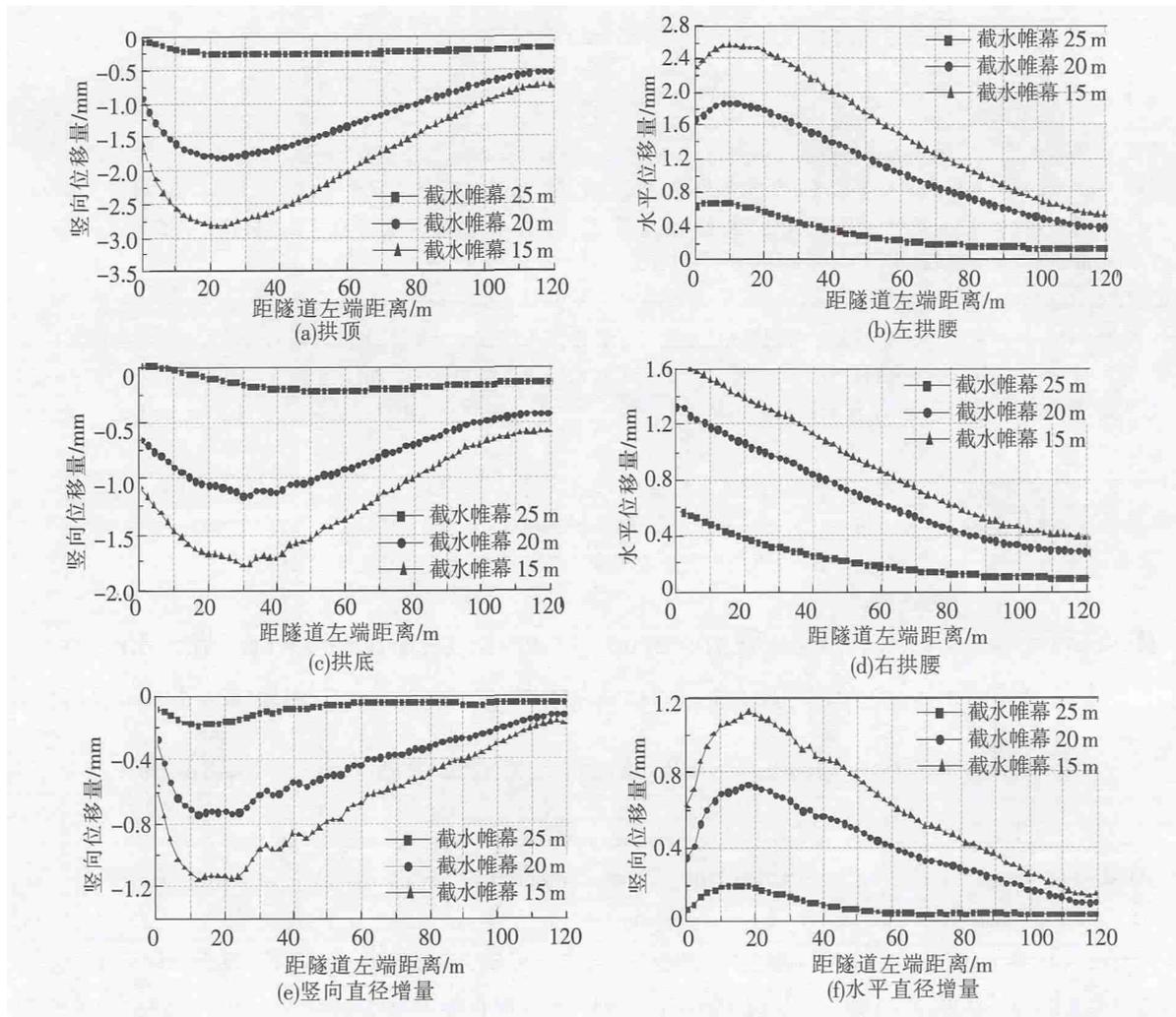


图 9 不同截水帷幕深度下隧道纵向各监测线变形图

5 结论

基于稳定渗流问题变分原理对深厚圆砾土层深基坑截水帷幕深度对紧邻地铁隧道变形影响进行理论研究,建立地铁区间结构整体有限元模型,采用 MIDAS/GTS 大型三维有限元软件开展深基坑截水帷幕深度对紧邻地铁隧道变形影响研究。在结合基坑实际开挖工况条件下,分别考虑了截水帷幕深度为 15 m, 20 m, 25 m 时隧道的变形特性,并对 3 种模拟方案结果进行对比,得到如下结论:

(1) 地铁隧道结构在基坑降水施工初始阶段,部分位置有上抬变形和偏离基坑方向变形的趋势。随着基坑降水开挖进行,结构变形由隆起转变为整体沉降,由偏离基坑转变为偏向基坑移动,地铁结构最终水平位移量与沉降量较接近。由于大刚度车站限制了隧道左端的变形,其最大变形位置在距离左端部 10~20 m 处,隧道竖向和水平变形趋势可以用三次曲线拟合。隧道结构受基坑开挖影响各断面呈现出斜向基坑方向“横鸭蛋”式变形。

(2) 截水帷幕深度降低,隧道周边孔隙水压力值也减少,且断面各处孔压值呈现均匀减少趋势。随着截水帷幕深度增加,弯矩变化线斜率不断降低,当截水帷幕深度为 25 m 时,隧道弯矩几乎不随降水进程而变化。随着截水帷幕深度增加,左线隧道沉降和横向变形降低趋势明显,隧道最小曲率半径增大,隧道纵向弯曲程度降低。

(3) 随着截水帷幕深度增加、降水次数的增加,隧道的横向变形和竖向变形均降低,且隧道断面的变形也会改善。当截水帷幕深度由 15 m 增加到 25 m 时,隧道纵向轴线最大沉降降低 90%,最大水平位移

降低 75%。因此增加截水帷幕深度可以有效地保护基坑周边地铁区间结构。

参 考 文 献

- [1]魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013(5):1421-1428.
- [2]唐仁, 林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014(S1):1629-1634+1639.
- [3]丁习富, 师海, 孟小伟. 深基坑开挖与紧邻在建地铁车站影响优化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014(S2):1817-1822.
- [4]Petr Demenkov, Pavel Verbilo. Methodology of prediction stress-strain state deep foundation structures of subway station's taking into account stages of its construction[J]. Procedia Engineering, 2016, 165:379-384.
- [5]丛竺, 杨小平, 刘庭金. 强透水砂层运营地铁隧道正上方基坑施工关键技术[J]. 施工技术, 2015(13):51-55.
- [6]彭琦, 王建新, 刘建国. 考虑流固耦合效应的基坑开挖施工对地铁隧道结构影响分析[J]. 隧道建设, 2013(7):557-561.
- [7]谢建斌, 曾宪明, 胡井友, 等. 硬化土模型在桩锚与桩撑组合支护深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014(S2):56-63.
- [8]刘树亚, 欧阳蓉. 基坑工程对深圳地铁的结构变形影响和风险控制技术[J]. 岩土工程学报, 2012(S1):638-643.
- [9]贾夫子, 王立峰, 逯武全, 等. 基坑开挖对近邻地铁车站和隧道的影响[J]. 岩土力学, 2016(S2):673-678+714.
- [10]郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016(6):1-24.

Research on the Effect of Waterproof Curtain Depth of Deep Foundation Pit in Round Gravel Soil on Deformation of Adjacent Subway Tunnel

Lin Huangchao, Xie Jianbin, Chen Yansheng, Zhang Shuibing, Ma Tengfei

(School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on the variation principle of steady seepage problem, the influence of waterproof curtain depth of deep foundation pit on the deformation of subway tunnel was studied. The length of the waterproof curtain of the foundation pit mainly determined the shape of the seepage field of the groundwater around the foundation pit, which led to the change of pore water pressure outside the pit, and then changed the soil stress applied to the surrounding tunnel. In this article, MIDAS/GTS large-scale 3D finite element software was adopted to consider the deformation characteristics of the tunnel when the waterproof curtain depth was 15 m, 20 m and 25 m, respectively, and a comparative analysis was conducted. The results showed that increasing the waterproof curtain depth of the foundation pit can effectively protected the subway structure around the foundation pit.

Key words: excavation of foundation pit; shield subway; numerical simulation; waterproof curtain