

基于有限元的粉土区综合管廊位移研究

郭培培¹, 季宏宇^{2*}, 王胜利³, 涂雄伟³, 胡朋², 迟连阳⁴

1. 青岛市公路事业发展中心, 山东 青岛 266061; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357;

3. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250101;

4. 新疆新工勘岩土工程勘察设计院有限公司山东分公司, 山东 济南 250102

摘要:为研究地下水位变化对粉土区综合管廊位移的影响,采用有限元软件 PLAXIS 3D 构建埋地综合管廊数值模型,为验证综合管廊数值模型的可靠性,根据相似定理建立埋地综合管廊缩尺模型,缩尺比例为 1:20;通过改变地下水位、河道水位和埋深,模拟分析综合管廊位移的变化情况。结果表明:1) 缩尺模型试验验证了数值模型的渗流参数设置合理,可用于分析不同地下水位变化对综合管廊位移的影响。2) 随地下水位垂直下降幅度增大,竖直方向距综合管廊越远,路表的沉降越大;地下水位垂直下降 5~7 m 时,综合管廊上方路表与两侧无管廊区域路表的沉降差逐渐减小;地下水位垂直下降 8 m 时,综合管廊上方路表的沉降明显高于两侧无管廊区域路表的沉降。随地下水位垂直上升幅度增大,水平方向距综合管廊越远,路表的位移越小,综合管廊区域的路表与两侧无管廊区域路表的最大位移差越大;综合管廊底部所处平面地基的最大位移差增大,明显大于同一地下水位高度时的路表最大位移差。3) 综合管廊的竖向位移和侧向位移随河道水位变化呈周期性变化,枯水期河道水位下降,综合管廊的沉降增大,侧向位移增大,丰水期河道水位上升,综合管廊回归原位,临近河道和路表一侧的位移受河道水位升降的影响较大。4) 随地下水位下降,综合管廊埋深越浅,沉降越大,浅埋管廊的位移受地下水位变化的影响较大。在综合管廊实际工程应用中,高水位地区不宜采用浅埋方式。

关键词:综合管廊;有限元分析;地下水位;河道水位;位移

中图分类号:U459; TU745.3; TU990.3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0044-08

引用格式:郭培培,季宏宇,王胜利,等.基于有限元的粉土区综合管廊位移研究[J].山东交通学院学报,2025,33(4):44-51.

GUO Peipei, JI Hongyu, WANG Shengli, et al. Research on the displacement of a comprehensive utility tunnel in silty soil based on finite element method[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4):44-51.

0 引言

综合管廊是埋设在城市道路下方的各类管线综合体,与周围土体相互作用,所处环境复杂多变^[1-3]。地下水位变化影响综合管廊周围土体的物理和力学性能,进而影响地下结构的受力变形和沉降,在粉土地基中,此类问题更突出^[4-5],尤其在富水区。城市地下水位受大气降水、地表水和河道水位的影响较大,综合管廊结构易产生上浮或沉降变形,影响综合管廊的正常运行^[6]。因此,需研究地下水位变化对综合管廊位移的影响,为城市规划管理提供参考数据。

从水对地下构造物的影响方面,蔡直言等^[7]通过数值模拟分析不同水位和不同位置溶槽蓄水对隧道

收稿日期:2024-10-12

基金项目:山东省交通科技创新计划项目(2022B17)

第一作者简介:郭培培(1982—),男,安徽宿州人,高级工程师,主要研究方向为国道新改建及养护工程的技术管理, E-mail:114098686@qq.com。

*通信作者信简介:季宏宇(1999—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设, E-mail:1327920748@qq.com。

衬砌受力的影响,认为溶槽处于高水位时衬砌结构存在开裂和破损的风险;Bhattacharya 等^[8]认为挖掘隧道时若存在地下水会产生渗流力,岩体稳定性下降;雷炯霄等^[9]以济南地铁为例,探讨地铁建设与地下水保护的关系,认为地下水位壅高可能引发地下工程渗水、涌水等安全问题;Wang 等^[10]分析浅层隧道顶板坍塌机理,当地下水位下降或支撑力、岩石经验参数、抗压强度或抗拉强度增大时,坍塌范围扩大。地下水位变化影响地下构造物的施工难度和使用寿命。刘创^[11]将理论推导与三维数值模型相结合,研究地下水位变化对综合管廊整体和接口处受力变形的影响,认为底板出现裂缝的概率更大,顶板和靠近河流的侧壁更易发生疲劳破坏,顶板更可能发生受拉破坏,出现裂缝或渗水现象;张亮^[12]通过数值模拟研究雨水下渗对综合管廊稳定性的影响,认为降雨强度越大,基坑边坡的位移反应越大,基坑的稳定性扰动也越大,但未考虑河道水位变化对综合管廊沉降的影响。

随着综合管廊建设量的增大,综合管廊建设和服役过程中的受力和变形等问题突显。徐健等^[13]采用软件 ABAQUS 构建管廊结构三维数值模型,研究不同车载状态下综合管廊纵向和接口段的力学特性及其变化规律,认为综合管廊结构应力与荷载幅值正相关,加载位置对管廊接口处承口端受力影响较大;施有志等^[14]结合有限元软件 PLAXIS 3D 和现场试验,研究动荷载对综合管廊寿命的影响,发现管廊的疲劳破坏主要受拉应力控制,管廊埋深越大,拱顶所受拉应力越大,疲劳寿命不如埋深较小的管廊;万飞等^[15]采用有限元软件 ANSYS 建立管廊-车辆荷载三维模型,研究综合管廊在不同车辆荷载条件下的应力响应,将管廊的主拉应力时程曲线划分为上升区、峰值区及下降区,管廊疲劳损伤主要集中在管廊的中舱顶板、两中隔墙的顶端和底端,中舱顶板所受疲劳损伤最大;张福麟^[16]采用软件 ABAQUS 分析车辆荷载作用下综合管廊的力学特性及应力疲劳损伤,认为整体现浇管廊的抗疲劳寿命优于预制管廊。

从综合管廊沉降和位移的角度考虑,李奉庭等^[17]依托雄安新区某综合管廊项目,采用软件 ABAQUS 分析综合管廊回填后路面的沉降,认为在阶梯法回填施工中,施工回填段数越多,路面沉降及不均匀沉降程度越小,综合管廊的沉降越大;邓博团等^[18]研究湿陷性黄土地基浸水后的不均匀沉降对现浇管廊结构的影响,管廊底部局部浸水导致不均匀沉降时,结构受力表现为底板受拉、顶板受压,且越远离管廊中部,应变越小;董志磊等^[19]研究湿陷性黄土地基对预制管廊结构的影响,黄土地基不均匀沉降后,预制管廊结构呈受弯、受扭状态;段旭等^[20]通过缩尺模型试验研究车辆动荷载作用下浅埋综合管廊及周围黄土路基的动力响应规律,管廊底板与下部土体的接触压力变化幅度较小,随车辆动荷载强度的增大,管廊顶板、侧壁的动态应变响应增幅明显,在顶板与侧壁掖角部位出现一定的应力集中现象;杨钊等^[21]分析管廊施工现场沉降监测数据,认为不均匀沉降和变形缝错台是导致大里程段综合管廊开裂的根本原因。目前关于黄土区综合管廊沉降的研究较多,但粉土条件下综合管廊的沉降问题研究较少,且研究更偏向于竖向位移,对综合管廊的侧向位移研究较少。

本文基于有限元软件 PLAXIS 3D 构建埋地综合管廊数值模型,通过改变地下水位高度、综合管廊位置和埋深,分析远离河道和临近河道 2 种工况下综合管廊位移的变化情况,以期为解决地下水位变化对埋地综合管廊沉降和变形影响等问题提供技术参考。

1 综合管廊数值模型构建

1.1 模型参数

采用有限元软件 PLAXIS 3D 建立综合管廊数值模型,选用 C30 混凝土路面,采用长 15.0 m、宽 8.4 m、高 5.5 m 的矩形双舱钢筋混凝土管廊结构,初始埋深 2 m;混凝土路面和综合管廊采用 LE 线弹性模型;土体结构自上而下依次为素填土、粉土和粉质黏土;填土和路基材料采用小应变硬化土(hardening soil small, HSS)模型;土体模型长 70 m、宽 15 m、高 30 m;地下水初始埋深 1 m。土体结构模型材料参数如表 1 所示。泊松比均为 0.2,素填土、粉质黏土和粉土的剪切模量衰减至初始剪切模量的 70%,对应的剪切应变为 1,破坏比为 0.9。路面的有效密度和饱和密度均为 2.24 kg/m^3 ,割线模量为 30 GPa;综合管廊的有效密度和饱和密度均为 2.55 kg/m^3 ,割线模量为 35 GPa。

表 1 土体结构模型材料物理力学参数

土层名称	有效密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	参考围压/ kPa	割线模 量/MPa	固结模 量/MPa	卸载-再加 载模量/MPa	静止土压 力系数	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
素填土	1.76	2.17	17.2	12.9	100	35.0	35.0	105.0	0.786	0.010
粉质黏土	1.78	2.22	32.0	22.0	100	17.3	17.3	51.9	0.758	0.002
粉土	1.71	2.14	7.5	29.8	100	12.6	12.6	37.8	0.753	0.080

1.2 约束

定义综合管廊轴线的法线方向为 x 轴,轴线方向为 y 轴,重力反方向为 z 轴。为模拟各结构层真实的受力状态,在模型四周施加侧向约束,混凝土路面施加 y 轴方向和 z 轴方向约束,对模型的底部施加完全约束。综合管廊数值模型见图 1。

1.3 数值模型验证

为验证综合管廊数值模型的可靠性,根据相似定理建立埋地综合管廊缩尺模型,缩尺比例为 1 : 20;缩尺模型的土体为天然粉土,经重塑、筛分后在模型箱中逐层填筑,如图 2 所示。分别在综合管廊的顶部和管廊底部同等深度的土体内设置 cj-1、cj-2 和 cj-3 三个沉降板,通过千分表读取不同位置的沉降;采用水箱控制缩尺模型箱内水位的变化。根据缩尺模型试验和数值模拟结果,分别绘制综合管廊的位移与不同地下水位的关系曲线,如图 3 所示。

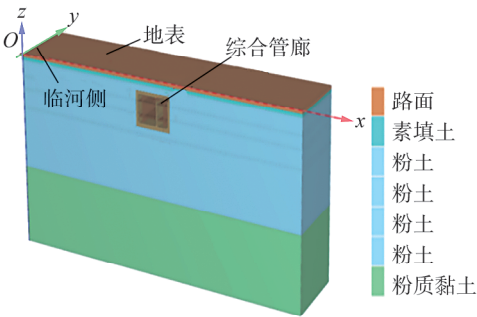


图 1 综合管廊数值模型

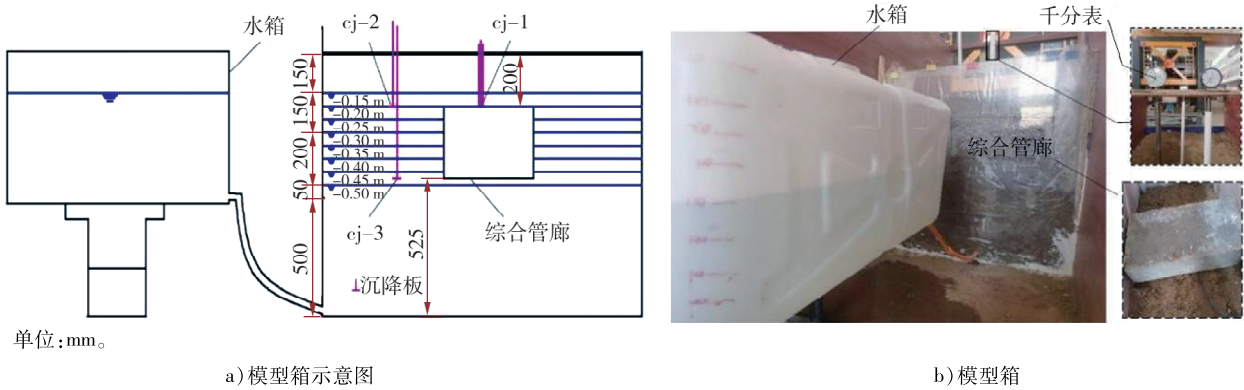


图 2 综合管廊缩尺模型

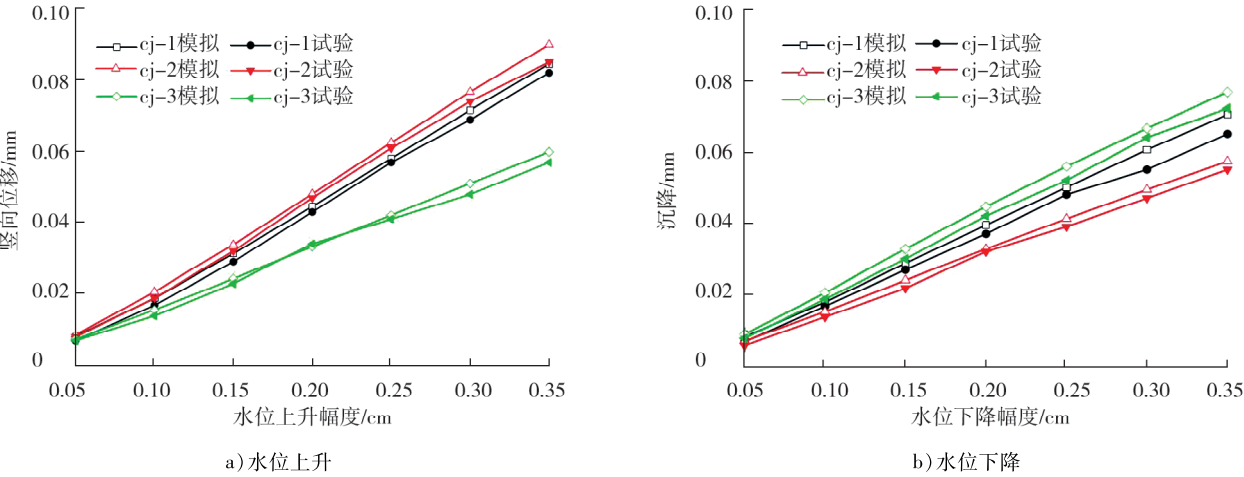


图 3 缩尺模型试验与数值模拟结果对比

由图3 a)可知:地下水位上升时,综合管廊区域不同位置的位移均为正,说明综合管廊产生向上的位移,其中测点cj-2的位移最大,测点cj-3的位移最小;3个测点的模拟位移和试验位移相差较小,在最高水位时,缩尺模型3个测点的位移分别为0.082、0.085、0.057 mm;得到3个测点在数值模拟中的位移分别为0.085、0.090、0.060 mm,同一测点在缩尺模型试验和数值模拟中位移的最大相对差为0.005 mm。由图3 b)可知:随着地下水位的下降,缩尺模型各测点的沉降不断增大;与地下水位上升时类似,3个测点的数值模拟沉降和试验沉降结果相差较小,最低水位时,数值模型结果与缩尺模型试验结果的最大相对差仅为0.004 mm。通过缩尺模型试验可验证数值模型渗流参数设置合理,可用于分析不同地下水位河道水位及埋深对综合管廊位移的影响。

2 综合管廊的位移分析

2.1 地下水位变化对综合管廊位移的影响

当综合管廊所处地基远离河道或水库时,地下水位主要受季节性降水的影响,雨季时地下水位迅速升高,旱季时缺少降水的补给,地下水位逐渐下降。地下水位与综合管廊的相对位置如图4所示。由图4可知:地下水位近似垂直升降,设置最高水位为1 m,最低水位为-9 m,水位变动幅度为1~8 m。以路表和综合管廊底部平面的位移为评价指标,分析地下水位垂直升降对综合管廊位移的影响。

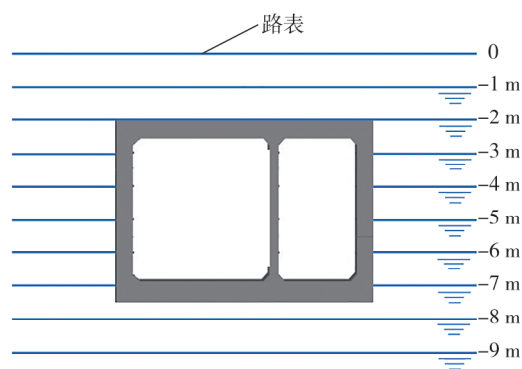


图4 地下水位与综合管廊的相对位置

2.1.1 地下水位垂直下降

为研究地下水位垂直下降对综合管廊位移的影响,根据数值模拟结果,绘制地下水位垂直下降1~8 m(初始地下水位埋深1 m)时,路表平面及综合管廊底部平面的沉降变化曲线,如图5所示。

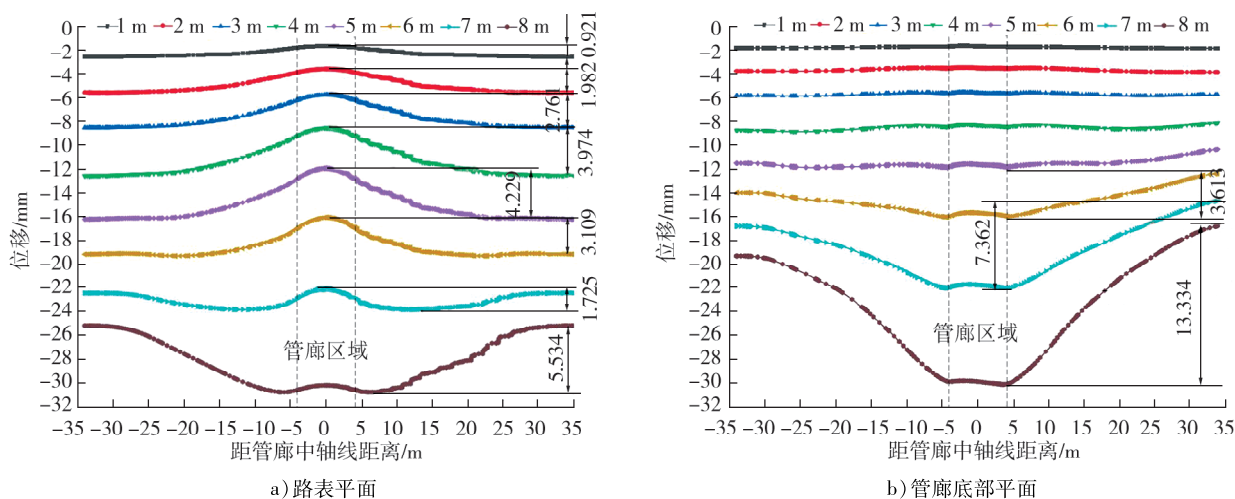


图5 地下水位垂直下降1~8 m时路表平面及综合管廊底部平面的沉降变化曲线

由图5 a)可知:1)地下水位垂直下降1~7 m时,路表水平方向距综合管廊越远,沉降越大。2)地下水位垂直下降1 m时,综合管廊中轴线处路表的沉降为1.620 mm,路表平面的最大沉降为2.540 mm,沉降差约为0.920 mm。3)地下水位垂直下降5 m时,综合管廊上方路表与两侧无管廊区域路表的最大沉降差为4.229 mm,为地下水位下降1 m时的4.6倍。原因是综合管廊具有隔水和支撑作用,能降低地下水渗流对管廊上方土体的影响;而综合管廊两侧的土体受地下水位下降的影响较大,有效自重应力增大,

沉降较大。4) 地下水位垂直下降 5~7 m 时, 综合管廊上方路表与两侧无管廊区域路表的沉降差逐渐减小。5) 地下水位垂直下降 8 m 时, 综合管廊上方路表的沉降为 30.710 mm, 明显高于两侧无管廊区域路表的沉降。原因是地下水位降至综合管廊底部平面以下时, 综合管廊受水的浮力作用减小, 综合管廊对下方粉土的压缩作用增大, 综合管廊上方路表的沉降迅速增大。

由图 5 b) 可知: 1) 地下水位垂直下降 1~5 m 时, 综合管廊底部平面和无管廊位置的沉降相近, 说明地下水位小幅降低对综合管廊底部平面沉降的影响较小。原因是管廊底部所处平面埋深为 7~8 m, 粉土地基自重应力较大, 土体处于相对密实状态, 地下水位向下渗流带来的有效应力增大, 对土体影响较小。2) 当地下水位分别垂直下降 6、7、8 m 时, 综合管廊底部和两侧无管廊位置的最大沉降差分别为 3.613、7.362、13.334 mm, 综合管廊底部的最大沉降为 30.070 mm, 综合管廊区域的沉降明显大于两侧无管廊区域。原因是综合管廊下方粉土受渗流影响增大, 孔隙水压力减小, 同时综合管廊受浮力影响变小, 对下方粉土的压缩作用增大, 综合管廊下方土体有效应力增大, 进一步压缩土体。

2.1.2 地下水位垂直上升

研究地下水位垂直上升对路表平面及综合管廊位移的影响, 根据数值模拟结果, 绘制地下水位垂直上升 1~8 m (初始地下水位埋深 9 m) 时, 路表平面及综合管廊底部平面的位移变化曲线, 如图 6 所示。

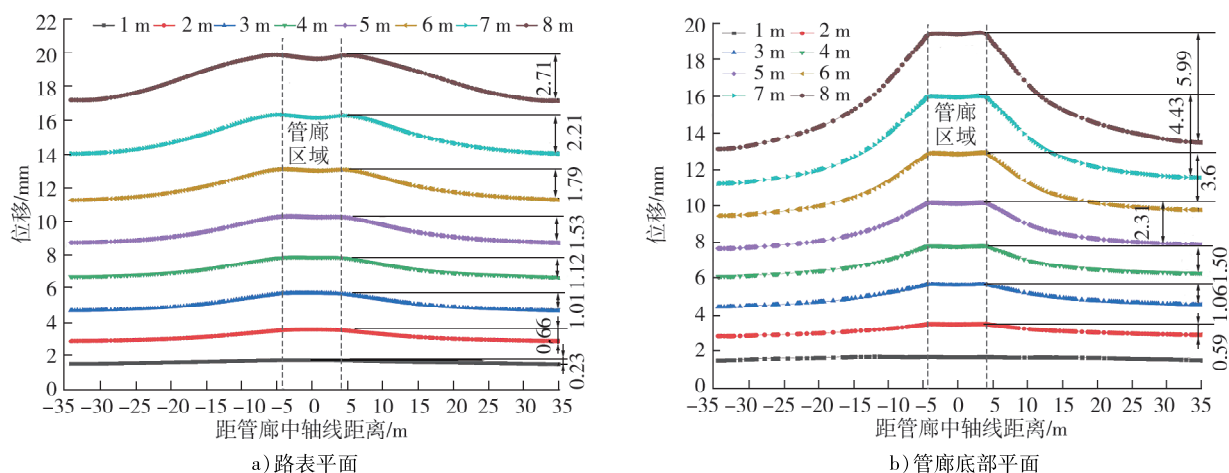


图 6 地下水位垂直上升 1~8 m 时路表平面及综合管廊底部平面的位移变化曲线

由图 6a) 可知: 地下水位垂直上升 1~8 m 时, 路表水平方向距综合管廊越远, 位移越小, 综合管廊区域的路表与两侧无管廊区域路表的最大位移差越大; 地下水位垂直上升 1 m, 综合管廊区域路表的最大位移为 1.760 mm, 无综合管廊位置的最大位移为 1.530 mm, 二者位移差为 0.230 mm; 地下水位垂直上升 8 m, 综合管廊区域路表与两侧无管廊区域最大位移差为 2.710 mm, 为水位垂直上升 1 m 时的 11.78 倍。原因是随地下水位的垂直上升, 地下水对综合管廊的浮力作用增大, 综合管廊产生向上的位移; 同时地下水向上渗流增大粉土中的孔隙水压力, 增大土体浮力, 当土体浮力超过路面结构的重量时, 路表产生向上的位移。

由图 6 b) 可知: 随着地下水位垂直上升 1~8 m, 综合管廊底部所处平面地基的最大位移差增大, 但明显大于同一地下水位高度时的路表最大位移差。地下水位上升 8 m 时, 综合管廊底部与两侧地基的最大位移差为 5.99 mm, 路表产生的最大位移差为 2.71 mm。

2.2 河道水位变化对综合管廊位移的影响

当综合管廊所处地基临近河道或水库时, 地下水位受河道水位的影响呈周期性变化, 丰水期河道水位升高, 河道水通过渗流作用补给地下水; 枯水期河道水位降低, 地下水向河道汇集。为研究河道水位变化对综合管廊位移的影响, 设置水位涨落周期为 12 个月 (其中第 1—6 月为枯水期, 第 7—12 月为丰水期), 河道水位变动幅度为 5 m, 河道位于综合管廊的左侧。根据数值模拟结果, 绘制综合管廊不同位置的沉降及侧向位移随河道水位周期性变化的关系曲线, 如图 7 所示。

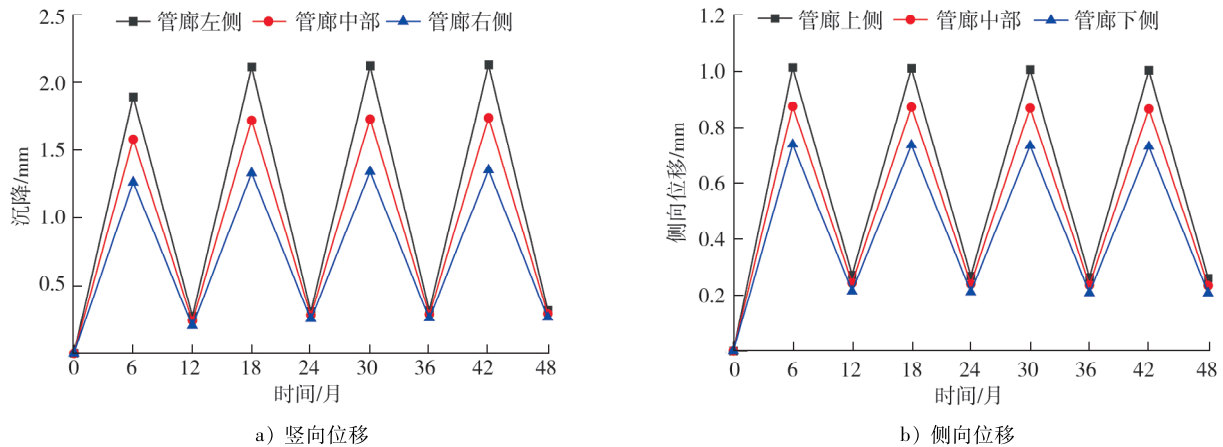


图7 综合管廊不同位置的沉降及侧向位移随河道水位周期性变化的关系曲线

由图7 a)可知:综合管廊的竖向位移随河道水位变化呈周期性变化,枯水期河道水位下降,综合管廊的沉降增大,丰水期河道水位上升,综合管廊产生回归原位趋势;河道水位涨落的第一个周期,综合管廊左、右侧的最大沉降分别为1.901、1.268 mm,累计沉降分别为0.240、0.203 mm,左侧最大沉降约为右侧的1.5倍,水位上升未能使综合管廊恢复至初始位置。随着河道水位的周期性升降,此后每个周期综合管廊左侧的最大沉降约为2.130 mm,右侧的最大沉降约为1.258 mm。在4个变化周期中,综合管廊左侧位移始终大于右侧,原因是靠近河道一侧受河道水位变化的影响较大。

由图7 b)可知:与竖向位移变化相似,综合管廊的侧向位移随河道水位变化呈周期性变化;在河道水位下降时,综合管廊向河道方向移动,在河道水位上升时,综合管廊向远离河道方向移动;随河道水位的升降,综合管廊上侧和下侧的侧向位移不同,各周期综合管廊上侧的最大沉降约为1.014 mm,下侧的最大沉降约为0.735 mm。说明河道水位变化对综合管廊临近路表一侧的侧向位移影响较大。

2.3 埋深对综合管廊位移的影响

为研究地下水位变化对不同埋深综合管廊位移的影响,设置综合管廊的埋深分别为2、3、4 m,地下水水位的变化范围为2~8 m,水位每下降2 m测量一次数据。根据数值模拟结果,绘制不同埋深的综合管廊竖向位移变化曲线,如图8所示。

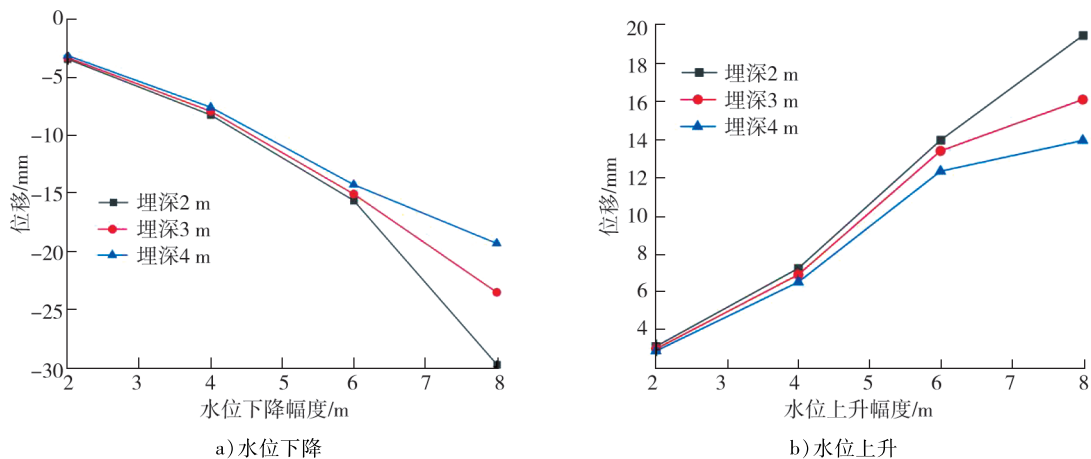


图8 不同埋深的综合管廊竖向位移变化曲线

由图8可知:随地下水水位的变化,不同埋深的综合管廊沉降不同,当地下水位下降8 m时,埋深2、4 m的综合管廊分别沉降29.800、19.320 mm,前者为后者的1.54倍,说明埋深越浅,综合管廊产生的沉降越大。地下水位上升8 m时,埋深2、4 m的综合管廊分别上移19.480、13.970 mm,前者为后者的1.39倍。

地下水位变化时,综合管廊的位移与埋深成反比,浅埋管廊的位移受地下水位变化的影响较大。因此在综合管廊实际工程应用中,应综合考虑地下水位对综合管廊带来的影响,高水位地区不宜采用浅埋方式。

3 结论

基于有限元软件 PLAXIS 3D 构建埋地综合管廊数值模型,分析远离河道和临近河道 2 种工况下,地下水位高度、河道水位和综合管廊埋深变化时,综合管廊及周边路表的位移变化。

1)随地下水位垂直下降幅度增大,竖直方向距综合管廊越远,路表沉降越大;地下水位垂直下降 5~7 m 时,综合管廊上方路表与两侧无管廊区域路表的沉降差逐渐减小;地下水位垂直下降 8 m 时,综合管廊上方路表的沉降明显高于两侧无管廊区域路表的沉降。随地下水位垂直上升幅度增大,水平方向距综合管廊越远,路表位移越小,综合管廊区域的路表与两侧无管廊区域路表的最大位移差越大;综合管廊底部所处平面地基的最大位移差增大,明显大于同一地下水位高度时的路表最大位移差。

2)综合管廊的竖向位移随河道水位变化呈周期性变化,枯水期河道水位下降,综合管廊的沉降增大,丰水期河道水位上升,综合管廊回归原位,综合管廊靠近河道一侧的位移始终大于远离河道的另一侧;综合管廊的侧向位移与竖向位移变化相似,随河道水位变化呈周期性变化。河道水位下降时,综合管廊向河道方向移动,在河道水位上升时,综合管廊向远离河道方向移动,河道水位变化对综合管廊临近路表一侧的侧向位移影响较大。

3)随地下水位下降,综合管廊埋深越浅,沉降越大,位移与其埋设深度成反比,浅埋管廊的位移受地下水位变化的影响较大。在综合管廊实际工程应用中,高水位地区不宜采用浅埋方式。

参考文献:

- [1] WANG T Y, TAN L X, XIE S Y, et al. Development and applications of common utility tunnels in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 76: 92-106.
- [2] ZHANG X H, GUAN Y X, FANG Z, et al. Fire risk analysis and prevention of urban comprehensive pipeline corridor[J]. Procedia Engineer, 2016, 135: 462-467.
- [3] CANTO-PERELLO J, CUIEL-ESPARZA J, CALVO V. Strategic decision support system for utility tunnel's planning applying A'WOT method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 146-152.
- [4] 梁宁慧,兰菲,庄炆,等.城市地下综合管廊建设现状与存在问题[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1622-1635.
- [5] 刘天书.地下水对土体物理特性和地基承载力的影响研究[J].建材技术与应用,2019(4):12-15.
- [6] 陈云娟,刘梦悦,尹福强,等.富水地层管廊基坑开挖变形及损伤演化分析[J].山东建筑大学学报,2024,39(4):8-15.
- [7] 蔡直言,伍毅敏,许鹏,等.溶槽水位波动对隧道衬砌的力学影响模拟分析[J].中国岩溶,2023,42(6):1270-1281.
- [8] BHATTACHARYA P, DUTTA P. Stability of rectangular tunnel in Hoek-Brown rocks under steady-state groundwater flow[J]. Geotechnique Letters, 2020, 10(4): 524-534.
- [9] 雷炳霄,邢立亭,董亚楠,等.地铁建设对地下水环境的影响:以济南市经十路为例[J].科学技术与工程,2023,23(31):13273-13280.
- [10] WANG H T, WANG L G, LI S C, et al. Roof collapse mechanisms for a shallow tunnel in two-layer rock strata incorporating the influence of groundwater[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 215-227.
- [11] 刘创.水位变动条件下综合管廊的力学性状研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
- [12] 张亮.地下综合管廊降雨分析及土体接触数值模拟与试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.
- [13] 徐健,谢忠球,吴敬龙.交通荷载下预制综合管廊受力特性研究[J].振动、测试与诊断,2021,41(2):377-384.
- [14] 施有志,阮建凑,林树枝,等.机动车动荷载对地下综合管廊的影响分析[J].地震工程与工程振动,2022,42(3):62-71.
- [15] 万飞,黎忠灏,赖金星,等.车辆荷载下综合管廊应力响应及疲劳损伤分析[J].科学技术与工程,2022,22(22):

9830-9839.

- [16] 张福麟. 机动车荷载作用下装配式综合管廊力学特性及疲劳损伤分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [17] 李奉庭,罗涛,孙占勇,等. 地下管廊深基坑回填土层沉降特征研究[J]. 交通科学与工程,2024,40(3):82-90.
- [18] 邓博团,申超凡,郑谢缙,等. 黄土地基不均匀沉降对现浇管廊影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2024,56(2):212-219.
- [19] 董志磊,刘辉,李鑫,等. 黄土湿陷对预制管廊受力性能影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(5):704-711.
- [20] 段旭,刘武超,邹愈,等. 车辆动荷载作用下黄土地区浅埋综合管廊动力响应试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(6):1716-1725.
- [21] 杨钊,李勇智,杨睿. 现浇成型综合管廊不均匀沉降裂缝分析:以福州东南快速通道综合管廊为例[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(12):2098-2105.

Research on the displacement of a comprehensive utility tunnel in silty soil based on finite element method

GUO Peipei¹, JI Hongyu^{2}, WANG Shengli³, TU Xiongwei³,
HU Peng², CHI Lianyang⁴*

1. Qingdao Highway Development Center, Qingdao 266061, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

3. Jinan Kingyue Highway Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China;

4. Shandong Branch of Xinjiang Geotechnical Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250102, China

Abstract: To study the impact of groundwater level changes on the displacement of a comprehensive utility tunnel in loess areas, a numerical model of the buried comprehensive utility tunnel is constructed using the finite element software PLAXIS 3D. To verify the reliability of the numerical model, a scaled model of the buried comprehensive utility tunnel is established according to similarity theory, with a scale ratio of 1 : 20. By varying the groundwater level height, river channel water level, and burial depth, the changes in the displacement of the comprehensive utility tunnel are simulated and analyzed. The results indicate: 1) The scaled model tests can validate the reasonableness of the seepage parameters set in the numerical model, which can be used to analyze the impact of different groundwater levels on the displacement of the comprehensive utility tunnel. 2) As the vertical drop of the groundwater level increases, the further away the road surface is from the comprehensive utility tunnel in the vertical direction, the greater the settlement of the road surface; when the vertical drop of the groundwater level is 5-7 m, the settlement difference between the road surface above the comprehensive utility tunnel and that of the adjacent non-tunnel areas gradually decreases; when the vertical drop of the groundwater level is 8 m, the settlement of the road surface above the comprehensive utility tunnel is significantly higher than that of the adjacent non-tunnel areas. As the vertical rise of the groundwater level increases, the further away the road surface is from the comprehensive utility tunnel in the horizontal direction, the smaller the displacement of the road surface, and the greater the maximum displacement difference between the road surfaces in the comprehensive utility tunnel area and the adjacent non-tunnel areas; the maximum displacement difference of the plane foundation at the bottom of the comprehensive utility tunnel increases, which is significantly greater than the maximum displacement difference of the road surface at the same groundwater level height. 3) The vertical and lateral displacements of the comprehensive utility tunnel exhibit

(下转第 107 页)

vessels, an enhanced artificial potential field (E-APF) algorithm based on time to closest point of approach (TCPA) and distance to closest point of approach (DCPA) is proposed. This algorithm reconstructs the repulsive potential field function, introduces a dynamic weight adjustment mechanism, and combines relative motion dynamics to design an adaptive repulsive direction strategy. Simulation results indicate that in static obstacle scenarios, the E-APF algorithm can identify collision risks earlier and plan better paths compared to the T-APF algorithm; in dynamic obstacle scenarios, it effectively increases safety distances and reduces steering angles, significantly improving the accuracy of obstacle risk assessment and collision avoidance decision-making.

Keywords: autonomous vessel; emergency collision avoidance scenary; T-APF algorithm; E-APF algorithm; TCPA; DCPA

(责任编辑:王惠)

(上接第 51 页)

periodic changes with variations in the river channel water level; during the dry season, the river channel water level decreases, which leads to increased settlement and lateral displacement of the comprehensive utility tunnel, while during the wet season, the river channel water level rises, causing the comprehensive utility tunnel to return to its original position, with the displacement near the river channel and road surface being significantly affected by the fluctuations in the river channel water level. 4) As the groundwater level decreases, the shallower the burial depth of the comprehensive utility tunnel, the greater the settlement; the displacement of shallow-buried tunnels is significantly affected by changes in the groundwater level. In practical engineering applications of comprehensive utility tunnels, shallow burial is not advisable in high water level areas.

Keywords: comprehensive utility tunnel; finite element analysis; ground water level; riverway level; displacement

(责任编辑:王惠)

(上接第 99 页)

the linear quadratic regulator (LQR), and a steering control system is designed based on the sliding mode variable structure controller (SMVSC). Simulation experiments are conducted on the LQR forward control system and SMVSC steering control system. Simulation results show that: the actual steering angle of TWSBR reaches the desired steering angle after 1.2 s, the actual body tilt angle reaches the desired body tilt angle after 2 s, and the actual speed reaches the desired speed after 3 s. A trajectory tracking generator is designed, and a TWSBR trajectory tracking control system is constructed, and a TWSBR experimental platform is built. TWSBR trajectory tracking experiment is conducted. The experimental results show that the errors of TWSBR body tilt angle, body tilt angular velocity, steering angle, and steering angular velocity stabilize near 0 after 1 s, while the displacement error and speed error stabilize near 0 after 2 s. The fluctuation range of each state variable of TWSBR is small after stabilization. Considering factors such as sensor acquisition errors and motor drive precision, the results indicate that the TWSBR demonstrates good trajectory tracking performance, and achieves displacement tracking, speed tracking, body tilt angle tracking, and steering angle tracking.

Keywords: TWSBR; LQR forward control system; SMVSC steering control system; trajectory tracking; experimental platform

(责任编辑:边文超)