

DOI: 10.7672/sgjs2025110047

深基坑开挖诱发地下管线变形的透明土试验研究^{*}

郑金伙¹, 沈铭龙¹, 陈志波², 倪小东³, 史江伟³

(1. 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 2. 福州大学紫金地质与矿业学院岩土与地质工程系, 福建 福州 350116; 3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

[摘要] 地下工程施工会引起周边地层局部沉降, 导致邻近地下管道产生附加变形, 一旦管道附加变形或受力超过其承受极限, 将危及管道安全和正常使用。依托透明土模型试验模拟悬臂式和内撑式围护结构基坑施工, 探究不同类型局部地层沉降对管道接口转角、张开量的影响规律。研究表明, 悬臂式和内撑式围护结构基坑开挖分别会引起拱肩型和凹槽型地层位移。相比于拱肩型地层沉降, 管道接口转角对凹槽型地层沉降更敏感。内撑式围护结构基坑诱发的管道接口转角比悬臂式围护结构基坑大 1.46~2.03 倍。地层水平位移导致的管道接口张开量大于地层沉降的影响, 拱肩型地层位移导致的管道接口张开量大于凹槽型地层位移工况。

[关键词] 基坑; 变形; 模型试验; 地下管线

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0047-06

Transparent Soil Test Study of Underground Pipeline Deformation Induced by Deep Foundation Excavation

ZHENG Jinhua¹, SHEN Minglong¹, CHEN Zhibo², NI Xiaodong³, SHI Jiangwei³

(1. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350001, China;
2. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Underground engineering construction will cause local subsidence of surrounding strata, resulting in additional deformation of adjacent underground pipelines. Once the additional deformation or force of the pipeline exceeds its bearing limit, it will endanger the safety and normal use of the pipeline. Based on a transparent soil model test, two types of foundation excavation construction, the cantilever and internal bracing, were simulated, and the influence of different types of local strata subsidence on the angle and opening of the pipeline interface was explored. The results indicate that the excavation of the cantilever foundation excavation and the internal support foundation excavation will cause the displacement of spandrel type and groove type, respectively. Compared with the settlement of spandrel stratum, the rotation angle of pipeline interface is more sensitive to the settlement of groove stratum. The rotation angle of the pipe interface induced by the internal bracing foundation excavation is 1.46 ~ 2.03 times larger than that of the cantilever foundation excavation. The opening amount of the interface caused by the horizontal displacement of the stratum is much larger than the influence of the settlement of the stratum. Therefore, the opening amount of the pipeline interface caused by the displacement of the spandrel stratum is larger than that of the groove stratum.

Keywords: foundation excavation; deformation; model test; pipeline

0 引言

深基坑施工不可避免地会诱发不均匀地层位移, 进而引起邻近地下管线产生附加应力和变形。一旦附加变形过大, 轻者影响地下管道的正常运

^{*} 国家自然科学基金(51608170, 51779083)

[作者简介] 郑金伙, 高级工程师, E-mail: cegeo1984@163.com

[收稿日期] 2025-01-18

营,重者威胁城市居民的生命安全。

现有学者研究了地下工程施工引起的地层局部沉陷特征^[1-2]和地层沉陷-管线相互作用机理^[3-5],发现悬臂式和内撑式基坑施工分别诱发拱肩型和凹槽型位移。基于弹性地基梁和两阶段变形分析理论,提出了局部地层沉陷时既有管道变形的解析解答^[6-8]。另有学者开展了大量土工离心模型试验,研究地下工程施工顺序、地下工程和管道相对位置等因素对既有管线三维变形的影响^[9-10]。为了快速预测地下工程施工引起的管线变形,Shi 等^[11]提出了非均匀地层位移下管线弯曲变形预测方法。地下管道分为刚性、柔性管道,接口允许转动的管道称为柔性管道,否则为刚性管道。上述研究大都假定地下管道为连续结构,忽略了接口转动对管道变形的影响。

地下工程施工时,管线接口转动和轴向平移超过其使用极限后,密封性能受到影响,接口容易产生渗漏甚至破坏现象^[12]。Buco 等^[13]监测分析了城市地下排水管道的破坏机理,发现约 26.7%的管道破坏形式为接口旋转和轴向张开。因此,柔性管道接口变形特性应受到重点关注。依托透明土技术,开展了紧邻深基坑非连续地下管线接口变形特性研究,总结了拱肩型和凹槽型地层沉陷对管线接口转角和张开的影响规律。

1 试验方案

1.1 试验工况

透明土模型试验的相似比为 1 : 100,稳压水箱外轮廓为 200mm×200mm×205mm(长×宽×高),壁厚 5mm。水箱材质为高强度、高透明亚克力,内部设置高 150mm 的溢流板,以分隔稳压槽和溢流槽(见图 1)。

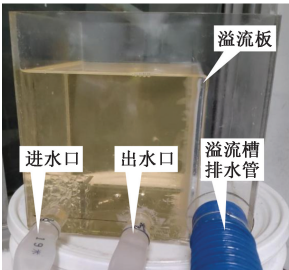


图 1 透明土模型试验箱

Fig. 1 Model box for transparent soil test

模型试验考虑了 2 种围护结构体系:悬臂式和内撑式。管道接口变形与基坑开挖深度、管道埋深密切相关。试验控制参数为基坑开挖深度比(h/D)和管道埋深比(H/D),其中, h 为基坑开挖深度, H

为管道埋深(管道顶部与地表的垂直距离), D 为管道外径。设计基坑开挖深度和管道埋深比分别介于 2~6 和 1~3,基坑采用逐级开挖,每级开挖深度 $h=2D$,直至开挖总深度 $6D$,共计 8 个模型试验,工况设置如表 1 所示。

表 1 试验工况设置
Table 1 Test condition setting

编号	h/D	管道埋置	H/D	围护结构形式	地层位移曲线类型
A1	2,4,6	无	—	悬臂式	拱肩型
A2	2,4,6	有	1	悬臂式	拱肩型
A3	2,4,6	有	2	悬臂式	拱肩型
A4	2,4,6	有	3	悬臂式	拱肩型
A5	2,4,6	无	—	内撑式	凹槽型
A6	2,4,6	有	1	内撑式	凹槽型
A7	2,4,6	有	2	内撑式	凹槽型
A8	2,4,6	有	3	内撑式	凹槽型

1.2 人工透明砂土配置

为了捕捉基坑施工引起的深层土体位移,采用熔融石英砂配置人工透明砂土^[14-15]。人工透明砂土颗粒级配曲线与现场土体一致(见图 2)。配置压实度达到 95%的透明砂,满足工程对市政地下管道回填土压实度的要求。熔融石英砂的折射率为 1.458 5,加入 15 号白油(折射率 1.468 0)和正十二烷(折射率 1.424 0)配置透明砂土。

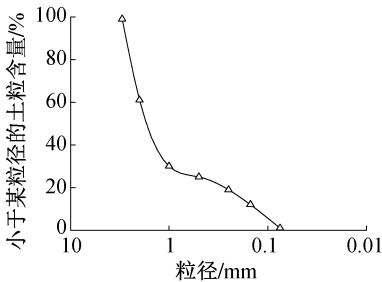


图 2 颗粒粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve

先剔除含雪花纹断面的不良颗粒,利用水洗清除细小杂质,保证熔融石英砂的纯度。然后,将正十二烷和 15 号白油按质量比 1 : 4 搅拌均匀,利用阿贝折射仪和石英玻璃棒辅助法将孔隙流体的折射率调至 1.458 5。最后填筑熔融石英砂以确保透明土的透明度,即每次用小勺子盛取少量熔融石英砂,慢慢浸入混合油液面以下,抖动勺子使熔融石英砂逐颗沉入装置中。

1.3 柔性管道模拟

柔性管道的材质为 PC 透明塑料硬管,其内径、外径和长度分别为 10,11,60mm,用于模拟实际工程中直径 1m、标准长度 6m 的承插式管道。城市基

坑工程施工时,不可避免地会横穿原有地下管道,为了解决基坑和管道相互干扰的问题,地下管道往往需要进行改迁。在试验箱内模拟管道改迁布置方法,管道垂直于基坑边缘布设(见图3)。

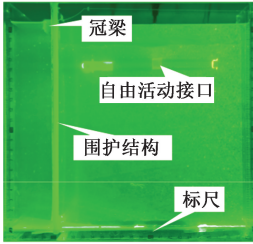


图3 透明土模型
Fig.3 Transparent soil model

1.4 图形采集和位移场分析

通过激光器发出的激光片光切入透明土和管道纵断面形成明亮的散斑场,利用高速工业相机(CCD)以固定的时间间隔拍摄图像。采用图形分析软件PIVlab分析2张图片的像素差异,得到基坑施工引起的土体相对位移。基于安装于模型箱底部和侧边的标尺将土体相对位移转化为真实位移(见图4)。

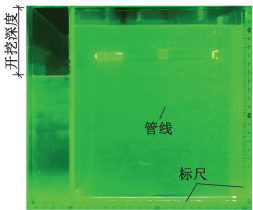


图4 基坑-管线相互作用的透明土模型
Fig.4 Transparent soil model of foundation-pipeline interaction

试验图像采集需重点关注管道纵切面上的信息,需清晰识别出透明土固体颗粒的轮廓。试验采用MGL-F-532绿光激光器和WP-US140/M高速工业相机,绿光激光器输出功率为2W,激光波长为531~533nm,片光张角范围为90°,激光厚2mm。高速工业相机的最大分辨率为1360×1024,最大帧率为20FPS,曝光时间为47~60μs,像元尺寸为4.65μm×4.65μm。

2 试验步骤

1) 分层填筑密实度为95%的熔融石英砂。填筑至管道标高后,安装地下管道,继续填筑熔融石英砂至模型箱的溢流标高。调整稳压水箱的液面高度,使其与透明模型箱液面齐平。

2) 调整图像采集系统,使激光平面照亮柔性管道纵断面,保证激光平面平行、相机拍摄轴线垂直

于透明模型箱的侧面。

3) 逐级开挖基坑至指定深度,利用相机记录整个试验过程。利用图形处理软件PIVlab分析试验图片,获取基坑外侧位移场。将管道剖面图像导入CAD画图软件,获取管道接口转角和张开量。

3 试验结果分析

3.1 基坑开挖引起的地表沉降和土体沉降

3.1.1 悬臂式围护结构基坑开挖

不同开挖深度下坑外地表竖向位移曲线如图5所示。基坑开挖深度越大,围护结构两侧土压力差值越大,因此,基坑开挖深度增加后,地表沉降不断增大。基坑开挖深度为2D,4D,6D时,基坑施工引起的最大地表沉降分别为1.13,1.94,2.91mm,介于(4.41%~5.14%)h。随着土体与围护结构水平距离的增加,地表沉降快速降低,呈拱肩型位移模式。基坑开挖深度为6D(66mm)时,距离围护结构180mm处,地表沉降接近于0,表明基坑开挖作用下土体沉降主要在3倍基坑开挖深度范围内,与已有研究结论一致^[16]。

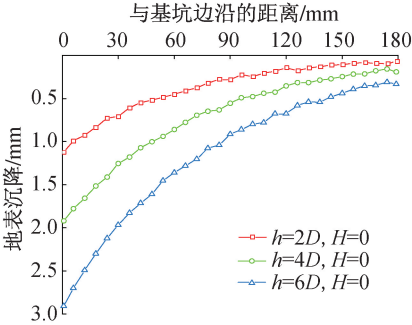


图5 悬臂式围护结构基坑开挖引起的地表沉降
Fig.5 Surface settlement due to foundation excavation for cantilevered enclosures

基坑开挖深度为6D时,不同管道埋深下土体竖向位移曲线如图6所示。土体沉降随着管道埋深增大而逐渐降低。管道埋深从0增至3D时,土体最大沉降由2.91mm降至2.35mm,降幅为19.2%。不同管道埋深下土体沉降范围基本一致,即3倍基坑开挖深度。

3.1.2 内撑式围护结构基坑开挖

内撑式基坑施工引起的地表沉降如图7所示。内撑式基坑的冠梁刚度较大,冠梁能有效限制围护结构内外侧土压力差引起的变形,围护结构顶部位移有限,冠梁下方围护结构将向基坑内发生挠曲变形。基坑开挖深度为2D,4D,6D时,基坑施工引起的最大地表沉降分别为0.65,1.35,2.19mm,介于(2.95%~3.32%)h。相比于悬臂式围护结构基坑,

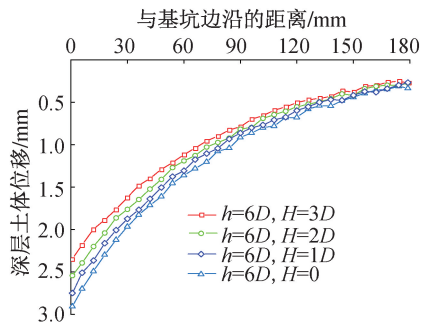


图 6 悬臂式围护结构基坑开挖引起的深层土体位移
Fig. 6 Displacement of deep soils due to foundation excavation for cantilevered perimeter structures

内撑式围护结构基坑开挖引起的地表沉降小 24.7%~42.5%,说明内支撑增加了基坑围护系统刚度,能有效控制基坑周边的土体沉降。基坑开挖深度为 4D,6D 时,最大土体沉降出现位置距离围护结构的水平距离为 45mm 和 70mm,与基坑开挖深度接近。地表沉降随着与围护结构距离的增大呈现先增大后减小趋势,沉降曲线呈明显的凹槽型。

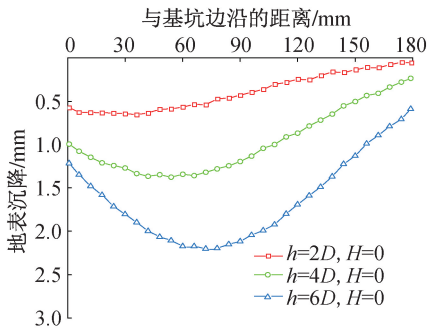


图 7 内撑式围护结构基坑开挖引起的地表沉降
Fig. 7 Surface settlement due to foundation excavation for internally braced enclosure structures

内撑式围护结构基坑开挖深度为 6D 时,不同管道埋深下深层土体竖向位移曲线如图 8 所示。不同管道埋深处土体沉降曲线形状一致,均为凹槽型变形模式。随着管道埋深的增加,基坑施工引起的地层变形逐渐减小。管道埋深从 0 增至 3D 时,土体最大沉降从 2.19mm 降至 1.90mm,降幅为 13.2%。

3.2 基坑开挖引起的深层土体水平位移

3.2.1 悬臂式围护结构基坑开挖

悬臂式围护结构基坑施工引起的深层土体水平位移如图 9 所示。水平位移曲线形态与沉降曲线一致,均为拱肩型。随着与围护结构距离的不断增大,土体水平位移快速降低。基坑开挖深度为 6D 时,土体最大水平位移为 1.94mm。管道埋深从 0 增至 3D 后,土体最大水平位移从 1.94mm 降低到 1.56mm,降幅为 19.6%。

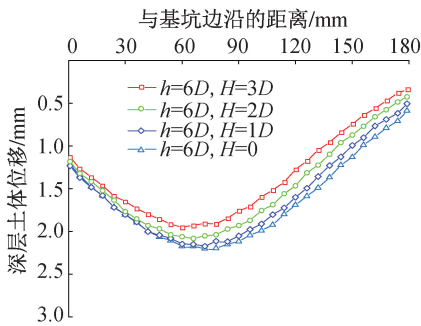


图 8 内撑式围护结构基坑开挖引起的深层土体位移
Fig. 8 Displacement of deep soils due to foundation excavation for internally braced enclosures

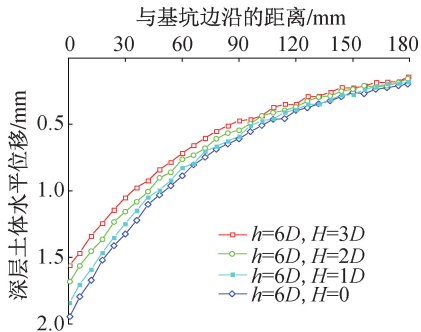


图 9 悬臂式围护结构基坑开挖引起的
深层土体水平位移
Fig. 9 Horizontal displacement of deep soil due to foundation excavation for cantilevered perimeter structures

3.2.2 内撑式围护结构基坑开挖

内撑式围护结构基坑施工引起的深层土体水平位移如图 10 所示。水平位移曲线形态与土体沉降曲线相似,均为凹槽型。与基坑围护结构距离增加后,深层土体水平位移先增大后减小,最大水平位移位于 1 倍基坑开挖深度处。基坑开挖深度为 6D 时,土体最大水平位移为 1.45mm,小于悬臂式围护结构基坑工况。管道埋深从 0 增至 3D 后,土体最大水平位移从 1.45mm 降低到 1.25mm,降幅为 13.8%。

3.3 既有管道变形

3.3.1 管道沉降

基坑施工引起的管道沉降如图 11 所示。悬臂式围护结构基坑周边地层位移为拱肩型,管道与周边土体同步变形,管道变形为上凸型,管道接口顶部受拉、底部受压。相反,内撑式围护结构基坑周边地层位移为凹槽型,管道也与周边土体同步变形,管道变形呈下凹型,管道接口底部受拉、顶部受压。

随着管道埋深比的增加,管道沉降逐步减小。

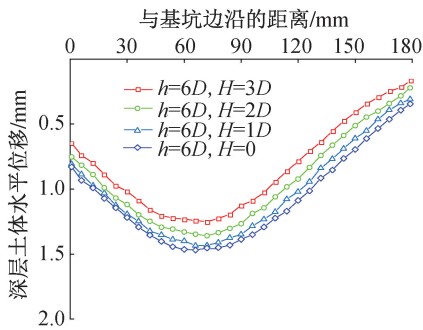


图 10 内撑式围护结构基坑开挖引起的深层土体水平位移
Fig. 10 Horizontal displacement of deep soil due to foundation excavation for internally braced enclosures

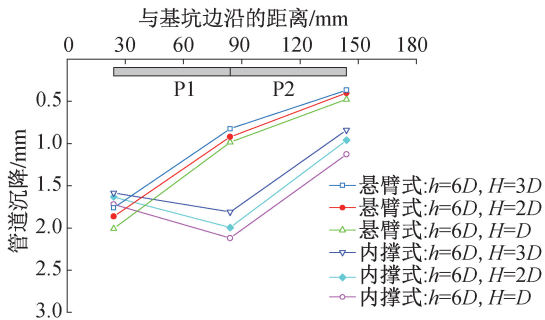


图 11 管道沉降变化曲线
Fig. 11 Variations curves of pipeline settlements

管道埋深比为 1,2,3 时,内撑式围护结构基坑引起的管道沉降分别为 2.02,1.87,1.76mm,而悬臂式围护结构基坑引起的管道沉降分别为 2.11,1.98,1.82mm。管道埋深比从 1 增至 3,基坑施工引起的管道沉降降幅为 13.7%。因此,管道改迁时,适当增加管道埋深可降低管道位移。悬臂式围护结构基坑坑外地表竖向位移随着与基坑距离的增大而减小,所以靠近基坑的管道 P1 两端差异竖向位移明显大于远离基坑的管道 P2。内撑式围护结构基坑管道 P2 位置处地层沉降曲线斜率大于管道 P1 所在位置,因此,管道 P2 的差异沉降大于管道 P1。

3.3.2 管道接口转角

基于基坑施工诱发的管道沉降,推求不同埋深比下管道接口转角。埋深比越大,基坑开挖引起的柔性管道接口转角越小。管道埋深比为 1,2,3 时,悬臂式围护结构基坑施工引起的接口转角分别为 0.54°,0.50°,0.40°,均未超过规范中接口允许的旋转角(1.0°)。虽然内撑式围护结构基坑开挖引起的土体最大沉降小于悬臂式围护结构基坑,但内撑式围护结构基坑开挖引起的管道接口转角明显大于悬臂式围护结构基坑。管道埋深比为 1,2,3 时,管道接口转角分别为 1.33°,1.29°,1.21°,均超过规范中接口允许的旋转角(1.0°)。

相同开挖深度下,内撑式围护结构基坑导致的地表竖向位移比悬臂式围护结构基坑小 24.7%~42.5%,而管道埋深比为 1,2,3 时,内撑式围护结构基坑诱发的管道接口转角比悬臂式围护结构基坑大 1.46~2.03 倍。这主要是因为内撑式基坑导致的坑外地层竖向位移曲线为凹槽型,导致管道接口转角大于悬臂式围护结构基坑。

3.3.3 管道接口张开量

基于现有文献资料,Elhmadi^[17]提出了柔性管道因接口拔出而失效的准则,即接口相对位移大于接口总深度 50%时,柔性管道因拔出而失效。基于图形处理软件,获取了不同埋深比下管道接口张开量(见图 12)。不均匀竖向位移下,内撑式围护结构基坑开挖引起的接口张开量高于悬臂式围护结构基坑,与接口转角一致。然而,在不均匀水平位移作用下,悬臂式围护结构基坑施工引起的接口张开量高于内撑式围护结构基坑。管道埋深比为 1,2,3 时,悬臂式围护结构基坑开挖引起的管道总张开量比内撑式围护结构基坑高 10%左右,表明柔性管道接口张开量主要受基坑施工引起的水平位移控制。

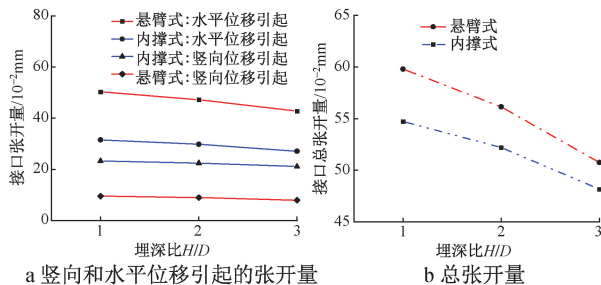


图 12 基坑开挖诱发的柔性管道接口张开量
Fig. 12 Foundation excavation-induced joint opening in the flexible pipelines

基坑开挖导致坑外土体产生水平位移。距离围护结构越近,悬臂式围护结构基坑引起的地层位移越大,即地层位移施加于管线的摩擦力逐渐增大。然而,内撑式围护结构基坑施工引起的地层位移为凹槽型,凹槽两侧土体施加于管线的摩擦力相反,即水平位移引起的轴向拉力低于悬臂式围护结构基坑。因此,悬臂式围护结构基坑开挖导致的管线接口张开量高于内撑式围护结构基坑。

4 结语

1) 基坑周边柔性管道变形模式与土体变形一致。悬臂式围护结构基坑周边管道变形呈上凸型,管道接口顶部受拉、底部受压。内撑式围护结构基坑周边管道变形呈下凹型,管道接口底部受拉、顶部受压。

2) 管道埋深比从 1 增至 3 后,基坑开挖引起的

柔性管道沉降降幅为 13.7%。内撑式围护结构基坑开挖引起的管道接口转角比悬臂式围护结构基坑大 1.46~2.03 倍。相比于拱肩型地层位移,管道接口转角对凹槽型地层位移更敏感。

3) 不均匀土体沉降下,内撑式围护结构基坑开挖引起的接口张开量高于悬臂式围护结构基坑。然而,水平位移作用下,悬臂式围护结构基坑施工引起的接口张开量高于内撑式围护结构基坑。管道埋深比为 1~3 时,悬臂式围护结构基坑开挖引起的管道总张开量比内撑式围护结构基坑高 10% 左右,表明地层水平位移导致的接口张开量大于地层沉降的影响。

参考文献:

- [1] 李忠超,贾琪,冯恒,等.黏土地层深基坑开挖对邻近建筑物影响研究[J].施工技术(中英文),2023,52(19):23-30.
LI Z C, JIA Q, FENG H, et al. Investigation of impact of excavation on adjacent building in clayey ground [J]. Construction technology, 2023, 52(19): 23-30.
- [2] 张成平,岳跃敬,王梦恕.隧道施工扰动下管线渗漏水对地面塌陷的影响及控制[J].土木工程学报,2015,48(S1):351-356.
ZHANG C P, YUE Y J, WANG M S. Influence of pipeline leakage on ground collapse and its control during adjacent tunnelling [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(S1): 351-356.
- [3] 胡运,周立成,苏悦琦.邻近密集管线深基坑开挖地层变形分析[J].施工技术(中英文),2023,52(13):30-36.
HU Y, ZHOU L C, SU Y Q. Analysis of ground deformation caused by excavation of deep foundation excavation under adjacent dense pipelines [J]. Construction technology, 2023, 52(13): 30-36.
- [4] 毛石林,孔志军,郭延辉,等.深基坑开挖对邻近高压天然气管线的安全影响模糊评价研究[J].施工技术(中英文),2022,51(23):107-111.
MAO S L, KONG Z J, GUO Y H, et al. Study on fuzzy evaluation of safety of deep foundation excavation adjacent to high pressure natural gas pipeline [J]. Construction technology, 2022, 51(23): 107-111.
- [5] 李涛,任东伟,刘学成,等.考虑深基坑支护结构变形的邻近管线变形解析方法[J].中国矿业大学学报,2023,52(1):86-97.
LI T, REN D W, LIU X C, et al. Study of analytical method of adjacent pipeline deformation considering the deformation of deep foundation pit supporting structure [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 86-97.
- [6] 张稳军,朱战魁,李瑶.城市地下管线受隧道施工影响的显式解分析[J].水力发电学报,2019,38(3):186-194.
ZHANG W J, ZHU Z K, LI Y. Explicit solution analysis of underground pipeline mechanical responses under tunnel construction conditions [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2019, 38(3): 186-194.
- [7] 张陈蓉,俞剑,黄茂松.基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J].岩土力学,2012,33(7):2027-2034.
ZHANG C R, YU J, HUANG M S. Deformation controlling criterion of effect on underground pipelines due to foundation pit excavation [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(7): 2027-2034.
- [8] 姜峥.基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J].地下空间与工程学报,2014,10(2):362-368.
JIANG Z. Theoretical analysis on deformation of pipeline caused by adjacent foundation pit excavation [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2014, 10(2): 362-368.
- [9] 马少坤,刘莹,邵羽,等.盾构双隧道不同开挖顺序及不同布置形式对管线的影响研究[J].岩土工程学报,2018,40(4):689-697.
MA S K, LIU Y, SHAO Y, et al. Effects of twin shield tunneling with different construction sequences and different relative locations on adjacent pipelines [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40(4): 689-697.
- [10] 郭延辉,严明,宋琴,等.深基坑开挖对临近既有高压天然气管道的影响[J].地下空间与工程学报,2021,17(S2):840-847.
GUO Y J, YAN M, SONG Q, et al. The influence of deep foundation pit excavation on the adjacent existing high pressure natural gas pipeline [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(S2): 840-847.
- [11] SHI J W, ZHONG X C, LU H, et al. Influence of joint stiffness on three-dimensional deformation mechanisms of pipeline under tunnel active face instability [J]. Canadian geotechnical journal, 2025, 62: 1-16.
- [12] O'ROURKE T D. Geohazards and large, geographically distributed systems [J]. Géotechnique, 2010, 60(7): 505-543.
- [13] BUCO J, EMERIAULT F, LE GAUFFRE P, et al. Statistical and 3D numerical identification of pipe and bedding characteristics responsible for longitudinal behavior of buried pipe [C]//Pipeline Division Specialty Conference, 2006.
- [14] 孔纲强,孙学谨,肖扬,等.透明土与标准砂压缩变形特性对比试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(10):1895-1903.
KONG G Q, SUN X J, XIAO Y, et al. Comparative experiments on compressive deformation properties of transparent soil and standard sand [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2016, 38(10): 1895-1903.
- [15] 孔纲强,李辉,王忠涛,等.透明砂土与天然砂土动力特性对比[J].岩土力学,2018,39(6):1935-1940,1947.
KONG G Q, LI H, WANG Z T, et al. Comparison of dynamic properties between transparent sand and natural sand [J]. Rock and soil mechanics, 2018, 39(6): 1935-1940, 1947.
- [16] CHEN W C, TANG L X, ZHAO H J, et al. Investigation of three-dimensional deformation mechanisms of existing tunnels due to nearby basement excavation in soft clay [J]. Geomechanics and engineering, 2023, 34(2): 115-124.
- [17] ELHMADI K. Seismic wave propagation effects on straight-jointed buried pipelines [D]. Troy, NY, USA: Rensselaer Polytechnic Institute, 1989.