

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202201029



斜抛撑支护基坑开挖对邻近 综合管廊的影响分析

方舒新¹, 蔡奇鹏¹, 马阳阳¹, 肖朝昀¹, 黄翀², 凌庆宇³, 林鼎宗¹

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 厦门市政管廊投资管理有限公司, 福建 厦门 361000;
3. 华宇(福建)置业集团有限公司, 福建 三明 353000)

摘要: 以福建省厦门市某邻近既有综合管廊基坑开挖项目为例, 针对 SMW 工法桩+斜抛撑支护体系, 采用 FLAC3D 有限差分软件建立综合管廊的三维数值模型, 进行数值结果分析; 研究综合管廊与基坑距离对基坑土体位移场、综合管廊位移和变形、综合管廊周围土体应力分布的影响。结果表明: 坑外地表沉降的影响范围不超过 12 m, 最大沉降位于坑外 4.5 m 处, 基坑开挖引起的综合管廊最大水平位移和竖向位移均未超过规范的预警值; 综合管廊与基坑距离和综合管廊水平位移近似成反比关系; 综合管廊发生朝向基坑一侧的倾斜, 倾斜度随着综合管廊与基坑距离的减小而增大; 综合管廊两侧墙产生朝向基坑的水平推力使综合管廊产生朝向基坑的变形和水平位移。

关键词: 基坑开挖; 斜抛撑; 综合管廊; 地表沉降; 数值模拟

中图分类号: TU 433; TV 551.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)05-0596-07

Effects of Foundation Pit Excavation With Inclined Support on Nearby Utility Tunnel

FANG Suxin¹, CAI Qipeng¹, MA Yangyang¹, XIAO Zhaoyu¹,
HUANG Chong², LING Qingyu³, LIN Dingzhong¹

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Xiamen Municipal Utility Tunnel Investment Management Limited Company, Xiamen 361000, China;
3. Huayu (Fujian) Estates Group Limited Company, Sanming 353000, China)

Abstract: Taking the foundation pit excavation project near an existing utility tunnel in Xiamen City, Fujian Province as an example, aiming at the SMW construction method pile and inclined support system, 3D numerical model of the utility tunnel is established by FLAC3D finite difference software, and the numerical results are analyzed, and the effects of the distance between the utility tunnel and the foundation pit on the displacement field of the foundation pit soil, the displacement and deformation of the utility tunnel, and the stress distribution of the soil around the utility tunnel are studied. The results show that the influence range of the surface settlement outside the foundation pit is less than 12 m, the maximum settlement is located at 4.5 m outside the foundation pit, and the maximum horizontal displacement and vertical displacement of the utility tunnel caused by the foundation pit excavation do not exceed the warning value of the specification. The distance be-

收稿日期: 2022-01-18

通信作者: 蔡奇鹏(1982-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的研究. E-mail: cqp@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778249); 福建省自然科学基金资助项目(2018J01072, 2022Y4015)

tween the utility tunnel and the foundation pit is approximately inversely proportional to the horizontal displacement of the utility tunnel. The utility tunnel inclines towards the foundation pit, and the incline degree increases with the decrease of the distance between the utility tunnel and the foundation pit. The horizontal thrust of the walls on both sides of the utility tunnel towards the foundation pit causes deformation and horizontal displacement of the utility tunnel towards the foundation pit.

Keywords: foundation pit excavation; inclined support; utility tunnel; surface settlement; numerical simulation

随着地下空间的不断开发利用,临近既有综合管廊的基坑开挖案例日渐增多. 如何确保地下综合管廊免受邻近工程施工影响成为地下综合管廊保护的重要课题. 目前,关于综合管廊的研究多集中于综合管廊结构的力学性能、地震作用响应等方面,关于基坑开挖对临近地下综合管廊影响的研究尚不多见. 田子玄^[1]通过综合管廊足尺试验,发现装配叠合式构件的延性优于现浇构件. 杨仕升等^[2]研究综合管廊节点的地震响应,发现结构相交处在地震作用下受力较大,但整体性能较好. 夏亚锋^[3]通过数值模拟研究发现随着埋深的增加,综合管廊各节点处应力集中现象加剧,综合管廊整体变形增大.

基坑开挖会引起土层应力释放和基坑周边土体位移,从而对临近地下建筑产生不利影响. 魏纲等^[4]采用明德林(Mindlin)解计算基坑开挖对下卧盾构隧道的附加荷载,推导出隧道的纵向变形量、环间剪切力、错台量和环间转角的计算公式. 田帅^[5]通过选取合理的基坑围护方案,细化上跨基坑开挖方式,可有效减少基坑开挖对下卧隧道的影响. 高广运等^[6]发现隧道与基坑水平间距越大,基坑开挖引起的隧道最终水平位移越小. 李顺群等^[7]发现基坑在开挖期间,坑外土体在水平和竖向均表现为卸荷作用,坑外不同位置隧道均向基坑方向偏移. 许四法等^[8]通过现场实测,得到邻近基坑隧道从围护结构施工开始至开挖结束全过程的变形发展规律. 以上研究有助于进一步分析基坑开挖对邻近综合管廊的影响. 相较于隧道而言,综合管廊的埋深一般较浅,且断面形式往往不同,故基坑开挖对邻近综合管廊与隧道的受力及变形特性的影响也存在差异. 基于此,本文以福建省厦门市某临近既有综合管廊基坑开挖项目为例,对斜抛撑支护基坑开挖对邻近综合管廊的影响进行分析.

1 工程背景

综合管廊与基坑的相对位置,如图 1 所示. 该项目的基坑平面呈四边形,长、宽均约为 180 m;项目拟建一层地下室,基坑开挖深度为 4.20~6.90 m. 邻近综合管廊为胶结预应力拼装式,综合管廊外边线与基坑水平距离为 10 m,小于国家标准 GB 51354—2019《城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准》^[9]中规定的安全控制距离(15 m). 综合管廊总长度约 6 km,截面尺寸为 5.65 m×3.40 m(宽×高),覆土深度为 2 m.

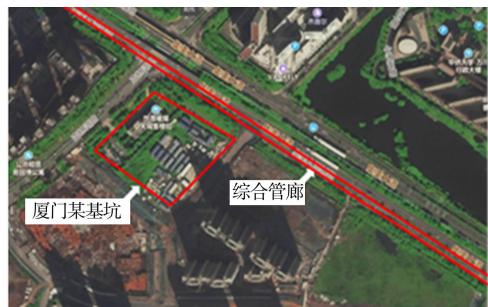


图 1 综合管廊与基坑的相对位置
Fig. 1 Relative position of utility tunnel and foundation pit

工程典型地层如下:杂填土,厚度为 4.0 m;淤泥,厚度为 2.0 m;粗砂,厚度为 3.1 m;残积砂质粘性土,厚度为 14.6 m;全风化花岗岩,厚度为 6.3 m;砂砾状强风化花岗岩,未揭穿.

基坑采用 SMW 工法桩+斜抛撑支护体系;搅拌桩采用 3Φ850@600 三轴水泥土搅拌桩,桩长为 12 m;搅拌桩内插 HN700×300@1 200 型钢,型钢长度为 12 m;斜抛撑采用 Φ609×16 钢管,长度为 15 m,支撑间距为 8 m.

2 数值建模及结果分析

2.1 模型尺寸网格划分及边界条件

模型尺寸,如图 2 所示. 采用 FLAC3D 有限差分软件建立三维数值模型,选取邻近综合管廊一侧基坑中部的典型开挖断面进行计算,依据斜抛撑支护间距,断面模型沿综合管廊轴线方向的计算厚度取 8 m;土体模型高度和基坑开挖深度分别取 $5H_e$ (30 m), H_e (6 m), H_e 为基坑开挖深度;当基坑开挖宽度大于 $5H_e$ 时,基坑开挖宽度的增大对支护桩及坑内外土体的影响较小^[10],故模型沿垂直于综合管廊轴

线方向的基坑开挖尺寸取 $5H_c$ (30 m);土体模型总长度为 100 m;综合管廊与基坑间距为 10 m;综合管廊截面尺寸为 $5.6\text{ m}\times3.4\text{ m}$ (宽 \times 高),综合管廊壁厚为 0.3 m.

刚度等效示意图,如图 3 所示.图 3 中: l 为 H 型钢的间距; h_c 为等效地连墙厚度,经计算,等效地连墙厚度取 510 mm.

SMW 工法桩按刚度等效的原则简化为混凝土地连墙,由于 H 型钢采用“插一跳一”方法布置,故以两根水泥土搅拌桩为计算单位,刚度等效计算公式为

$$E_a I_a + 2E_b I_b = E_c \frac{lh_c^3}{12}.$$

(1)

式(1)中: $E_a I_a$ 、 $E_b I_b$ 分别表示 H 型钢和水泥土搅拌桩的刚度; E_c 为 C30 混凝土的弹性模量.

为简化计算,地连墙及综合管廊结构均采用衬砌单元进行模拟.

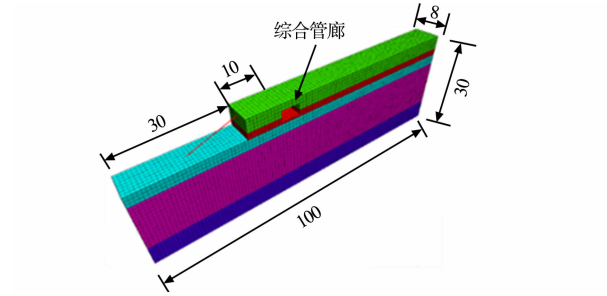


图 2 模型尺寸(单位:m)

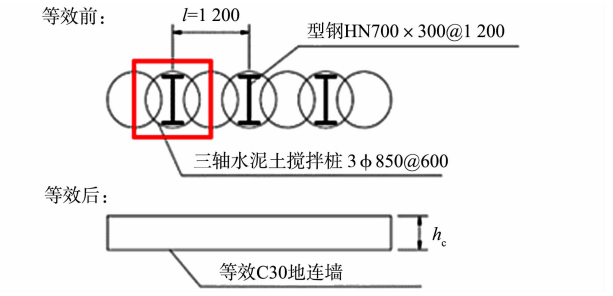


图 3 刚度等效示意图(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of model (unit: m)

Fig. 3 Schematic diagram of equivalent stiffness (unit: mm)

边界条件与网格划分,如图 4 所示.土体模型采用六面体单元,共划分为 24 000 个网格.土体模型的底面施加固定约束,约束底面土体单元 3 个方向的位移;土体模型的 4 个侧面施加滚轴边界条件,允许侧面土体单元产生竖向位移,约束其水平位移,以模拟模型外土体的约束作用.模拟围护墙及综合管廊的单元网格与接触的土体单元网格一致.斜抛撑及冠梁均采用梁单元模拟,激活斜抛撑后,约束斜抛撑底部节点 3 个方向的位移.

2.2 本构模型与土体参数

徐中华等^[11]对比不同土体的本构模型在基坑开挖数值模拟中的适用性,发现采用单一刚度的摩尔库伦(MC)模型会导致很大的坑底回弹,且难以得到合理的墙体及坑外土体变形;而修正剑桥(MCC)模型和硬化土(HS)模型考虑了土体硬化特性及加载、卸载行为的影响,适合于敏感环境下基坑开挖数值分析.针对 HS 模型所需参数较多,获取参数困难等问题,文献[12-13]采用 C++ 语言对 MC 模型进行二次开发,引入土体小应变刚度非线性特征曲线^[14],以考虑土体刚度随着应变的变化.

采用改进后的 MC 模型为本构模型,土体参数如表 1 所示.表 1 中: $\gamma_{0.7}$ 为剪切模量 G 为 $0.7G_0$ 时对应的剪切应变(G_0 为初始剪切模量)^[15]; ν 为泊松比; E_0 为初始弹性模量, $E_0 = 2(1 + \nu)G_0$; E_{fin} 为最终弹性模量(大应变弹模), E_{fin} 取 $3E_{s1-2} \sim 5E_{s1-2}$, E_{s1-2} 为压缩模量; c 为粘聚力; φ 为摩擦角; ρ 为土体密度.

表 1 本构模型的土体参数

Tab. 1 Soil parameters of constitutive model

地层	$\gamma_{0.7}/\times 10^{-4}$	E_0/MPa	E_{fin}/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	ν	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
杂填土	2	242	17	7	20	0.30	1 800
淤泥	2	83	10	10	2	0.40	1 800
粗砂	2	390	30	0	24	0.30	1 800
残积砂质粘性土	2	860	50	28	22	0.26	1 940
全风化花岗岩	2	1 200	100	25	28	0.24	1 900

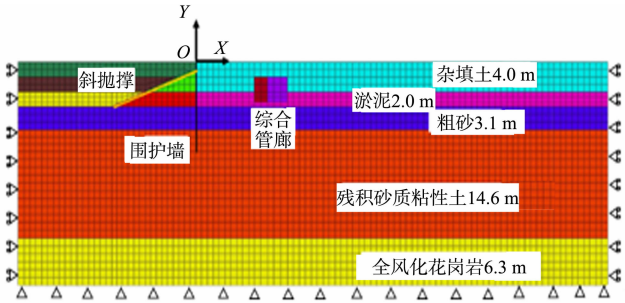


图 4 边界条件与网格划分

Fig. 4 Boundary conditions and mesh generation

剪切模量与剪切应变的关系为

$$G=G_0(\gamma_{0.7}/(\gamma_{0.7}+\alpha\gamma))^2.$$
 (2)

式(2)中: G_0 取 $9E_{s1-2}\sim30E_{s1-2}$, 换算系数根据不同土体进行取值, 对于淤泥质土, 换算系数取 $9\sim12$, 对于砂土, 换算系数取 $10\sim20$, 对于黏性土, 换算系数取 $15\sim30$ ^[16]; α 为常数, $\alpha=0.385$ ^[17]; γ 为剪切应变.

模拟围护墙及综合管廊衬砌单元的弹性模量和泊松比分别为 30 GPa, 0. 20. 衬砌单元与土体间设置接触面, 接触面法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 的计算公式为 $k_n=k_s=(K+4G/3)/\Delta z_{\min}$, K 为体积模量; Δz_{\min} 为衬砌单元临近土体网格的最小尺寸. 经计算可得, $k_n=k_s=480\text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$. 模拟斜抛撑的梁单元的弹性模量和泊松比分别为 200 GPa, 0. 25.

2.3 斜抛撑支护基坑开挖模拟步骤

斜抛撑支护基坑开挖模拟有以下 4 个步骤: 1) 进行初始地应力平衡, 建立综合管廊、围护墙模型, 并将模型产生的位移清零; 2) 分别完成非预留土台开挖 1~3(图 5); 3) 激活斜抛撑; 4) 分别完成预留土台开挖 4, 5.

2.4 数值结果分析

SMW 工法桩水平位移, 如图 6 所示. 图 6 中: s_h 为 SMW 工法桩水平位移; h 为埋深. 由图 6 可知: 进行非预留土台开挖 1~3 时, SMW 工法桩上未施加斜抛撑, 仅受到预留土台的支护作用, 此时实测 SMW 工法桩桩顶的位移最大; 进行预留土台开挖 4, 5 时, 斜抛撑已施加, 限制了 SMW 工法桩桩顶位移的发展; 预留土台开挖后, SMW 工法桩产生较大水平变形, 实测最大水平位移约为 6 mm, 位于地表以下 3 m 处.

基坑开挖后, 坑外地表沉降, 如图 7 所示. 图 7 中: s_v 为地表沉降; d_s 为计算点与 SMW 工法桩的距离. 由图 7 可知: 基坑开挖后的坑外地表沉降(模拟值)曲线为凹槽型; 进行非预留土台开挖 1~3 时, 坑外地表沉降模拟值较小, 未超过 1 mm; 进行预留土台开挖 4, 5 时, 坑外地表沉降模拟值明显增大, 最大值为 3. 5 mm, 位于坑外 4. 5 m 处($0.75H_e$); 预留土台开挖 5 完成后, 紧邻围护墙的地表沉降模拟值与冠梁顶沉降实测值较为接近, 约为 2 mm.

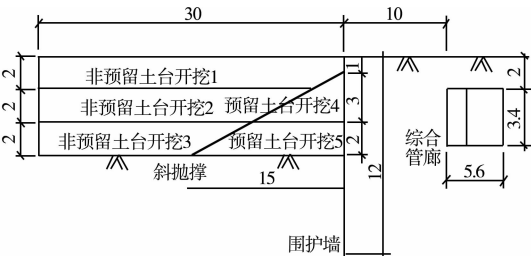


图 5 基坑开挖顺序及主要尺寸(单位: m)

Fig. 5 Foundation pit excavation sequence and main dimensions (unit: m)

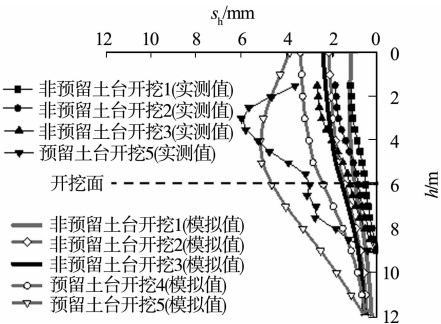


图 6 SMW 工法桩水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of SMW construction method pile

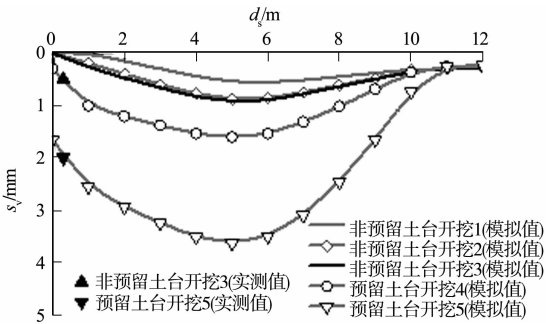


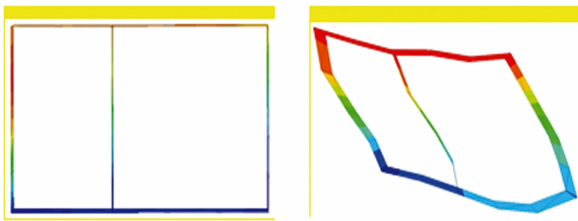
图 7 坑外地表沉降

Fig. 7 Surface settlement outside foundation pit

开挖过程中, 坑外地表沉降曲线的影响范围均不超过 12 m ($2H_e$), 这与文献[18]的结论一致. 由于综合管廊距离基坑 10 m, 表明综合管廊位于墙后凹型沉降槽的边界附近.

基坑开挖前、后的综合管廊截面对比图, 如图 8 所示. 图 8 中: 基坑开挖后的综合管廊截面图已放大 10 000 倍.

由图 8 及相关计算可知: 开挖完成后, 综合管廊截面发生剪切变形, 综合管廊顶板相对底板发生朝向基坑一侧的剪切移动; 综合管廊还产生



(a) 基坑开挖前 (b) 基坑开挖后

图 8 基坑开挖前、后综合管廊截面对比图

Fig. 8 Utility tunnel cross section comparison before and after foundation pit excavation

朝向基坑的水平位移和沉降,水平位移和沉降分别为 0.5,0.1 mm,均未超过 GB 51354—2019《城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准》^[9]的预警值。

3 综合管廊与基坑距离对综合管廊的影响

在保持基坑开挖深度(6 m)、SMW 工法桩长度(12 m)、综合管廊埋深(2 m)不变的前提下,进一步将综合管廊与基坑距离(D)由 10 m 分别减小至 8,6,4,2 m,展开数值分析,研究综合管廊与基坑距离对基坑土体位移场分布、综合管廊位移和变形、综合管廊周围土体应力分布的影响。

3.1 基坑土体位移场分布

基坑开挖完成后,坑外土体合位移等值线图,如图 9 所示。图 9 中: d_h 为土体与基坑的水平距离; d_v 为土体与地表的竖向距离;等值线的数字表示坑外土体的合位移,单位为 mm; β 为合位移等于 1 mm 的等值线与水平方向夹角。

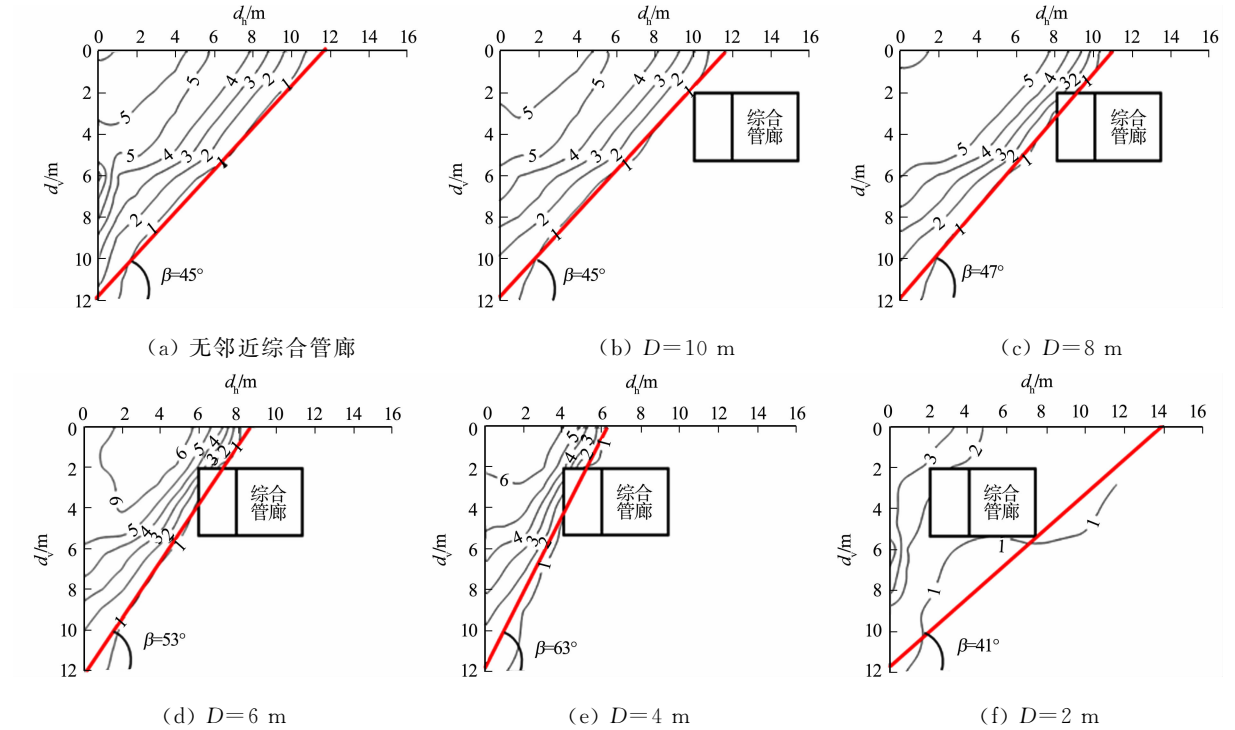


图 9 坑外土体合位移等值线图

Fig. 9 Contour map of combined displacement of soil outside foundation pit

由图 9 可知:当无邻近综合管廊时,基坑开挖完成后坑外土体产生斜向下朝向基坑的位移,合位移等于 1 mm 的等值线与水平方向的夹角为 45°;当综合管廊与基坑距离为 10 m 时,综合管廊主要位于稳定土体区域内,综合管廊对坑外土体的位移没有影响;当综合管廊与基坑距离分别减小至 8,6,4 m 时,合位移等于 1 mm 的等值线逐渐变陡,与水平方向的夹角分别增大至 47°,53°,63°,等值线绕过综合管廊顶板靠近基坑一侧腋角,并延伸至地表,综合管廊顶板靠近基坑一侧腋角部分进入坑外土体位移区;当综合管廊与基坑距离为 2 m 时,综合管廊完全进入坑外土体位移区,此时,合位移等于 1 mm 的等值线与水平方向夹角减小为 41°,并绕过综合管廊基础,从综合管廊底板远离基坑一侧的腋角延伸至地表,由于综合管廊较大的刚度起到“加固”坑外土体的作用,坑外土体的合位移显著减小。

3.2 综合管廊位移和变形

综合管廊与基坑距离对综合管廊位移的影响,如图 10 所示。图 10 中: s_t 为综合管廊位移; $s_{t,GH1} \sim s_{t,GH4}$ 分别为 4 个腋角的水平位移,水平位移以朝向基坑为正; $s_{t,GV1} \sim s_{t,GV4}$ 分别为 4 个腋角的竖向位移,竖向位移以沉降为正。由图 10 可知:基坑开挖完成后,综合管廊 4 个腋角均发生朝向基坑的水平位移;综合管廊顶板腋角 1,2 的水平位移基本相等,且大于底板腋角 3,4 的水平位移,这可能是由于综合管廊还发生了朝向基坑的倾斜;当综合管廊与基坑距离由 10 m 减小至 2 m 时,基坑开挖引起的综合管廊的

水平位移逐渐增大, 综合管廊与基坑距离和综合管廊水平位移近似成反比关系。

由图 10 还可知: 基坑开挖完成后, 同一侧墙两个腋角的竖向位移基本相等; 当综合管廊与基坑距离为 4~10 m 时, 综合管廊左、右侧墙的竖向位移基本相等; 当综合管廊与基坑距离减小至 2 m 时, 临近基坑的综合管廊侧墙发生沉降, 而远离基坑的综合管廊侧墙则发生上抬。

综合管廊与基坑距离对综合管廊倾斜的影响, 如图 11 所示。图 11 中: 综合管廊倾斜度(ζ)为顶板腋角 1, 2 的竖向位移差除以综合管廊宽度(B)。由图 11 可知: 当综合管廊与基坑距离为 6~10 m 时, 综合管廊几乎不发生倾斜; 当综合管廊与基坑距离分别减小至 4, 2 m 时, 综合管廊发生朝向基坑一侧的倾斜, 倾斜度分别为 0.002%, 0.008%, 表明在基坑开挖的影响下, 综合管廊发生朝向基坑一侧的倾斜, 这是由于随着综合管廊与基坑距离的减小, 综合管廊逐渐进入坑外土体位移区, 与周边土体产生协同变形。

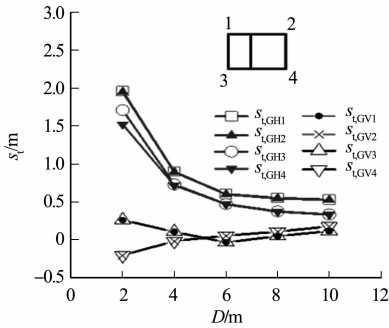


图 10 综合管廊与基坑距离对综合管廊位移的影响
Fig. 10 Effect of distance between utility tunnel and foundation pit on displacement of utility tunnel

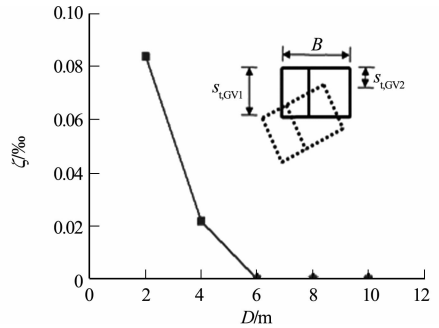
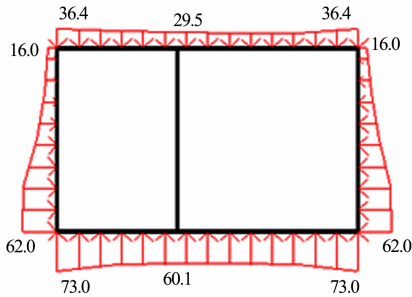


图 11 综合管廊与基坑距离对综合管廊倾斜的影响
Fig. 11 Effect of distance between utility tunnel and foundation pit on incline of utility tunnel

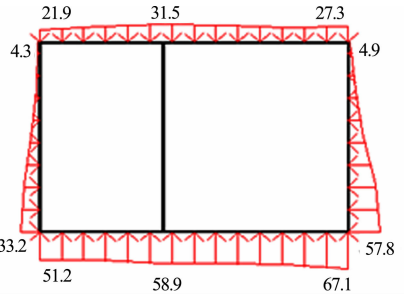
3.3 综合管廊周围土体应力分布

综合管廊与基坑距离为 2 m 时, 基坑开挖引起的综合管廊位移和倾斜较为显著, 综合管廊周围土体的应力分布, 如图 12 所示。

由相关计算可知: 基坑开挖前, 综合管廊结构四周土压力呈对称分布, 综合管廊侧墙外的水平土压力合力约为 $133 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$; 当基坑开挖后, 临近基坑侧墙和远离基坑侧墙的土压力合力分别减少为 $107, 64 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$; 综合管廊两侧墙产生朝向基坑的水平推力为 $43 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 使综合管廊产生朝向基坑的变形和水平位移; 当综合管廊与基坑距离分别增大至 4, 6, 8, 10 m 时, 基坑开挖引起的综合管廊水平推力分别减小为 17, 9, 6, 5 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 这是由于综合管廊受到基坑开挖引起的土层应力释放的影响。



(a) 基坑开挖前



(b) 基坑开挖后

图 12 综合管廊周围土体的应力分布(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 12 Stress distribution of soil around utility tunnel (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)

4 结论

1) 采用 SMW 工法桩+斜抛撑支护体系时, 坑外地表沉降的影响范围不超过 12 m ($2H_e$), 最大沉降位于坑外 4.5 m ($0.75H_e$) 处。

2) 基坑开挖完成后, 坑外土体影响区内发生朝向坑底的位移; 随着综合管廊与基坑距离的减小, 综

合管廊逐渐进入坑外土体位移区;当综合管廊完全进入坑外土体位移区时,综合管廊起到“加固”坑外土体的作用,坑外土体合位移显著减小.

3) 基坑开挖引起的综合管廊水平位移随着综合管廊与基坑距离的增大而减小,近似成反比关系.在基坑开挖影响下,综合管廊发生朝向基坑一侧倾斜,倾斜度随着综合管廊与基坑距离的减小而增大.

4) 基坑开挖前,综合管廊结构四周土压力呈对称分布;基坑开挖后,临近基坑侧墙和远离基坑侧墙的土压力均减少,且临近基坑侧墙的土压力减少量较大,使综合管廊产生朝向基坑的变形和水平位移.

参考文献:

[1] 田子玄. 装配叠合式混凝土地下综合管廊受力性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

[2] 杨仕升, 姜龙, 谢开仲. 城市地下综合管廊典型节点地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 103-110. DOI: 10. 13197/j. eeev. 2018. 05. 103. yangss. 012.

[3] 夏亚锋. 大型综合管廊不同工况下受力变形特征分析[D]. 保定: 河北大学, 2019.

[4] 魏纲, 张鑫海. 基坑开挖引起下卧盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2273-2284. DOI: 10. 11817/j. issn. 1672-7207. 2019. 09. 024.

[5] 田帅. 复杂环境下基坑上跨运营地铁隧道的保护方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊 2): 196-203. DOI: 10. 3973/j. issn. 2096-4498. 2020. S2. 025.

[6] 高广运, 吴勇, 张先林, 等. 深基坑开挖与邻近隧道相互影响的分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 2): 114-117. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2011. s2. 054.

[7] 李顺群, 马伟亮, 叶茂松, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 252-260. DOI: 10. 13349/j. cnki. jdxbn. 20211214. 002.

[8] 许四法, 周奇辉, 郑文豪, 等. 基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 804-812. DOI: 10. 11779/CJGE202105003.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准: GB 51354—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[10] 严昱翔. 偏压和基坑宽度对基坑稳定性和变形规律影响研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.

[11] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264.

[12] 李明广. 基坑群中相邻围护结构受力变形特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

[13] LI Mingguang, XIAO Xiao, WANG Jianhua, *et al.* Numerical study on responses of an existing metro line to staged deep excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 85: 268-291. DOI: 10. 1016/j. tust. 2018. 12. 005.

[14] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.

[15] ZHANG Wengang, ANTHONY T C G, FENG Xuan. A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 67-72. DOI: 10. 1016/j. compgeo. 2014. 09. 001.

[16] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.

[17] SANTOS J A D, CORREIA A G. Reference threshold shear strain of soil. Its application to obtain an unique strain-dependent shear modulus curve for soil[C]//15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul: [s. n.], 2001: 267-270.

[18] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of insitu walls: Design and performance of earth retaining structures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(4): 665-666. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-9410(1992)118:4(665).

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)