

软土深基坑围堰及基础施工对既有下穿管线的影响及保护措施研究

张玉成^{1, 2}, 杨光华^{1, 2, 3}, 胡海英⁴, 刘鹏⁵, 钟志辉³

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 5. 广州市水务规划勘测设计研究院, 广东 广州 510640)

摘要: 以软土地基管线上基坑围堰和泵站基础施工为工程背景, 研究了软土地基深基坑围堰及基础施工对既有下穿管线的影响及保护措施, 管线就在围堰下面和泵站基础底板内, 基坑围堰及基础施工对管线的影响成为该工程的关键之一。为此, 从管线安全控制标准、建立数值模型分析了开挖围堰施工及加固对管线的影响, 结果表明, 围堰施工对管线具有显著的垂直方向加载作用, 不可避免地引起管线顶部土体发生变位, 带动土体中的管线产生位移, 同时管线的应力状态也有所改变, 但是采用合理的加固措施, 施工期间管线的安全能够得到保证。本文成果可为优化设计和施工提供了有益的参考, 为类似工程提供借鉴。

关键词: 基坑; 管线; 围堰; 保护措施; 数值仿真

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0364-07

作者简介: 张玉成(1975-), 男, 内蒙古武川县人, 博士后, 副研究员/高级工程师, 从事岩土工程方面的咨询、设计和研究工作。E-mail: 125340752@qq.com。

Effect of construction of deep excavation cofferdams and foundation in soft soils on underneath pipelines and protective measures

ZHANG Yu-cheng^{1, 2}, YANG Guang-hua^{1, 2, 3}, HU Hai-ying⁴, LIU Peng⁵, ZHONG Zhi-hui³

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Pearl River Water Resources Scientific Research Institute, Guangzhou 510611, China; 5. Guangzhou Institute of Water Plan Investigation & Design, Guangzhou, 510640, China)

Abstract: Based on the construction of excavation cofferdams and pumping station foundation underneath pipelines in soft soils, the effect of the construction of excavation cofferdams and foundation on the pipelines and their protective measures are studied. The effect of the construction of the cofferdams and foundation on the pipelines is the key consideration because they are under the cofferdams and in the floor of the pumping station foundation. Therefore, based on the safety control standards, numerical models are established to analyze the effect of the construction on them. The results show that the cofferdam construction has considerable vertical loading impact on the pipelines, inevitably creating the deformation of the upper soil and causing the displacement of pipelines in soils. At the same time, the stress state changes as well. However, using the appropriate reinforcement measures, the safety of the pipelines can be guaranteed during the construction. The present results can be used to optimize the design and construction and provide reference for other similar projects.

Key words: excavation; pipeline; cofferdam; protective measure; numerical simulation

0 引言

随着城市建设的飞速发展, 处于建筑物、道路和地下管线等设施密集区的深基坑工程也日益增多, 从而对其周围环境产生较大的影响, 引起的工程事故越

来越多, 如邻近路面开裂、建筑物倾斜、地下管线破裂等, 这些事故的发生, 不仅带来了巨大的经济损失,

基金项目: 水利部公益性行业科研专项基金项目(201301028)

收稿日期: 2012-08-21

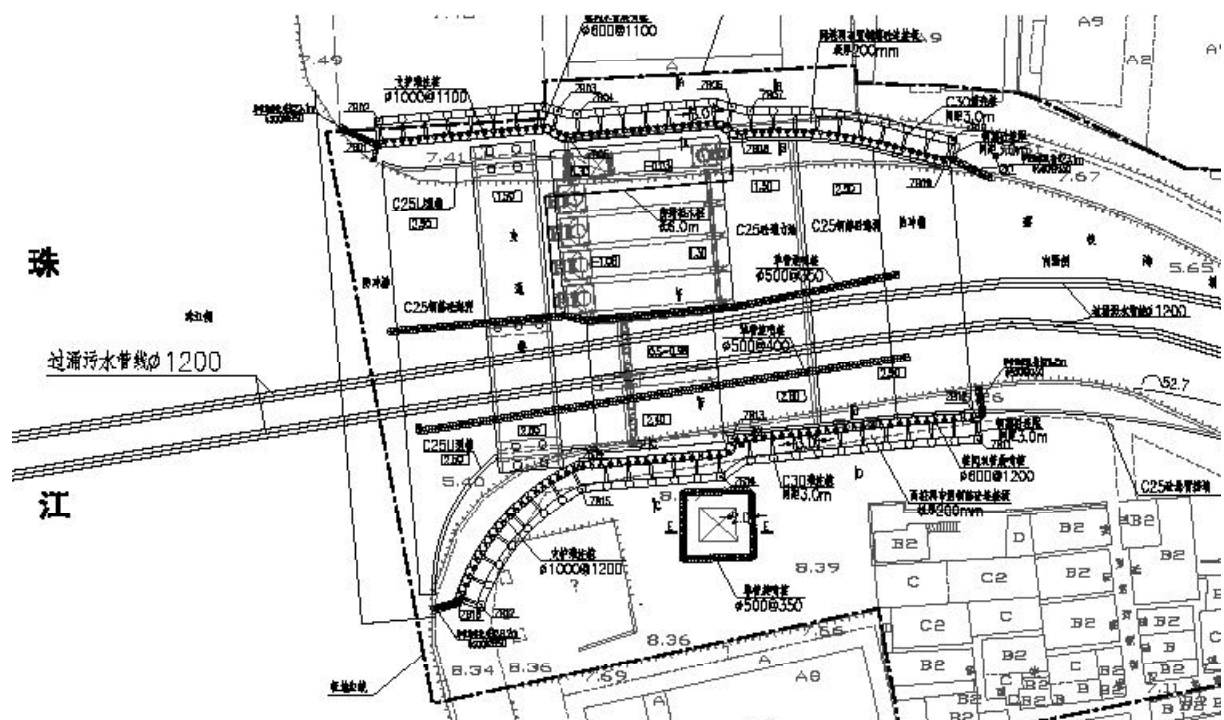


图1 管线与泵站平面关系图

Fig. 1 Plan relationship between pipelines and pumping station

且造成了不良的社会影响。尤其城市地下管线被誉为城市的生命线工程,其破坏直接关系到人民的生活和财产安全。因此,基坑开挖施工对地下管线的影响和保护措施逐渐受到相关部门的重视,也成为一个比较重要的课题^[1]。

虽然基坑工程的研究成果也较多,但以前基坑工程作为一个孤立的问题来考虑的,重点在基坑支护结构强度控制,而对基坑工程对环境的影响在设计时候考虑较少,随着人们的认识水平提高,现在逐渐把基坑工程与周围环境作为一个整体来考虑,这就要求人们实现从强度控制到变形控制的思想转变^[2]。

基坑开挖将会对下穿既有管线的稳定性产生影响,其最本质的原因是基坑的开挖卸载引起管线附近岩土体应力状态重分布,从而导致一系列力学行为变化。管线周边荷载变化引起管线变形,因此掌握基坑开挖过程中既有下穿管线的变形特性及内力分布是至关重要的。因此,合理选择控制下穿管线变形、基坑开挖施工工艺,保证管线的正常使用,成为工程界必须解决的课题^[3-4]。

本文以软土地基管线上基坑围堰和泵站基础施工为背景,开展了软土地基深基坑围堰及基础施工对既有下穿管线的影响及保护措施的研究,分析方法和结果、保护措施可为类似工程借鉴。

1 工程概况

本项目为广州市区某河涌上一排涝泵站的基坑工程,河道内已有2条管径1200 mm的污水压力钢管,污水管线从污水泵站出来经过河涌口段,穿越珠江西航道至大坦沙污水处理厂,2条污水管线承担着整个荔枝湾涌片区污水排放任务,管线安全十分重要。荔枝湾排涝泵站工程实施内外围堰以及泵站工程对污水管线可能会造成不利影响。为此,需要对工程过河涌(江)污水管线的影响进行研究,提出处理措施,以确保管线正常使用。

管线与泵站平面关系图见图1,管线与围堰平面关系见图2,基础与管线之间相互位置关系见图10。

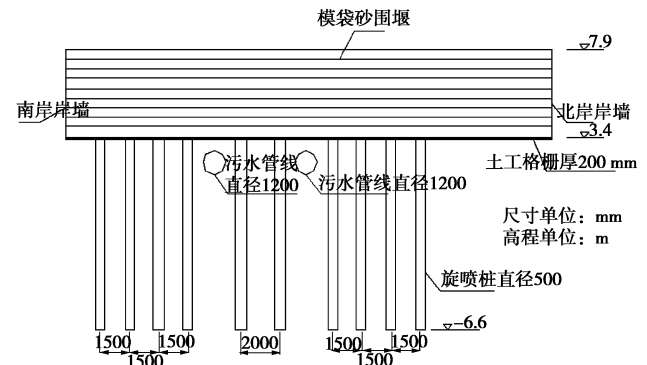


图2 管线与围堰平面关系图

Fig. 2 Plan relationship between pipelines and cofferdams

污水管线横穿排涝泵站，在基坑开挖和围堰施工期间需要对污水管线进行保护。对于水闸基础下污水管线的保护主要采取将管线埋置在水闸底板内，形成永久结构，基坑开挖过程中对管线采用支墩支撑；上下游消力池、海漫与污水关系交叉处主要采用支墩支撑；临时围堰与管线交叉处主要采用选喷桩加固处理。

1.1 场区地层条件

本场区地层自上而下按成因类型分为：①填土层，层厚 0.80~9.40 m；②淤泥，层厚 0.50~4.30 m；③粉细砂，层厚 6.10~13.80 m；④残积土，层厚 1.00~11.10 m；⑤基岩，依次为全风化、强风化、中风化和微风化。典型地质剖面见图 3。

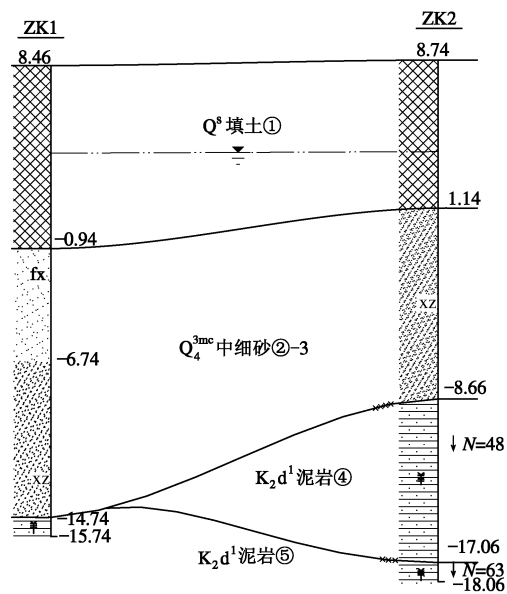


图 3 典型地质剖面图

Fig. 3 Typical geological section

1.2 分析计算时岩土体强度参数取值

岩土体参数取值见表 1，污水钢管采用 Q235 钢材。

表 1 岩土体参数取值

Table 1 Parameters of rock and soils

土层编号	土层名称	重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$	变形模量 E/MPa	泊松比
	填土	18	10	16	8	0.30
①	淤泥	16.1	6.7	5	4	0.35
②	粉细砂	19	0	20	25	0.30
③	残积土	20.6	25	20	30	0.30
④	全风化石岩	21	35	23	35	0.28
⑤	强风化石岩	21	60	25	70	0.25
⑥	弱风化石岩	22	120	30	100	0.20
⑦	填中砂	19	0	20	20	0.30

2 土体开挖对管线影响的原理

基坑开挖对开挖面以下土体具有显著的垂直方向卸荷作用，不可避免地引起坑底土体的回弹，并基坑

围护结构在土体压力作用下迫使基坑开挖面以下隧道结构向坑内位移，挤压坑内土体，加大了坑底土体的水平向应力，也使得坑底土体向上隆起。此外，随着基坑开挖深度的增加，基坑内外的土面高差不断增大，该高差所形成的加载作用和地表的各种超载，将使得围护结构外侧土体产生向基坑内的移动，使基坑坑底产生向上的隆起。当基坑下方土层中有管线时，坑底土体的隆起必然带动管线产生局部纵向变形，该变形值随着坑底土体的隆起量增加而增大。由于土体是一定程度密实的连续介质，基坑内土体开挖卸荷时，地层损失向管线传递，从而引起管线顶部土压力的变化，导致隧道的位移发生改变^[5-6]。

3 管线安全性判别方法与标准

管线类型判别：一般分为刚性管线与柔性接头管线。刚性接头管线一般包括：焊接接头的煤气管、输水钢管以及预制混凝土管等。对于这类管线一般采用材料力学的强度理论进行强度校核，其安全性可以由管道应力判断。柔性接头管线一般设有接头，且设有可适应一定接缝宽度的接缝材料。对于这类管线，其安全性一般有管道的允许曲率半径和接头张开角进行安全判别。本工程涉及管线为焊接钢管，其类型为刚性接头管线。

3.1 管道竖向变形控制值

文献[7]中对钢管最大竖向变形限值进行了以下规定：①当内防腐为水泥砂浆时，最大竖向变形不超过 0.02~0.03（为钢管计算直径）；②当内防腐为延性良好的涂料时，最大竖向变形不应超过 0.03~0.04。

3.2 管线的沉降控制值^[8]

（1）限定采用承插式接头的铸铁水管、钢筋混凝土水管两个接头之间的局部倾斜值不应大于 0.25%；采用焊接接头的水管，两个接头之间的局部倾斜值不应大于 0.6%；采用焊接接头的煤气管，两个接头之间的局部倾斜值不应大于 0.2%。

（2）当管线接头转动的角度或接缝张开值小于允许值时，管道接头处于安全状态，否则，也将产生泄漏或破坏，影响使用。承插接口铸铁管道和柔性接缝管道，每节许可差异沉降 $\leq L/1000$ （L 为管节长度）。

（3）德国建筑标准规定，管线允许水平变形为 0.6 mm/m，容许倾斜变形为 1~2 mm/m。

3.3 管线应力控制标准

文献[9]对管道强度提出了以下要求：

$$\eta\sigma_{\theta} \leq f, \quad \gamma_0\sigma \leq f. \tag{1}$$

式中 σ_{θ} 为钢管管壁截面的最大环向应力 (N/mm^2)； σ 为钢管管壁截面的最大组合折算应力 (N/mm^2)； η

为应力折算系数, 可取 0.9; f 为钢管管材或焊缝的强度设计值。

4 开挖围堰施工及加固对管线影响分析

现有类似的研究成果绝大多数是针对垂直于围护结构方向(横向)的地表沉降分析^[10-11]。由于管线埋置在地表下一定深度(一般 1.5~4.5 m)处, 且多数情况管线与基坑边平行(纵向), 该项目是管线直接下穿泵站工程, 基坑开挖、围堰施工是在管线顶部进行的, 因此要对管线顶部的土体变形场和应力场的分布性状进行研究。分析土体的变形场和应力场的变化规律是为了从总体上认识管线的变形性状和规律, 对于了解管线和土体相互作用关系, 分析管线受力提供依据和参数。

4.1 计算模型

为了研究泵站基坑开挖及围堰土体对管线路力学性状的影响, 需建立基坑内土体开挖, 围堰施工及土体和管线相互作用的三维分析模型。土层力学参数见表 1。本模型重点分析围堰施工、坑内土体开挖和管线加固措施对管线的影响, 围堰采用模袋砂围堰, 围堰和管线位置关系见图 4。

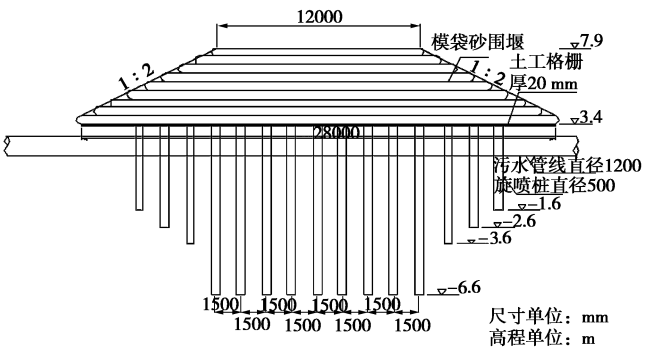


图 4 管线与围堰位置关系图

管道安全评估数值计算一般采用三种方法: 第一种方法采用建立地层计算模型, 并计算加载作用下地基的沉降。假设管线与地层变形同步, 将地基变形等效荷载施加在管线上。通过拟合的沉降曲线方程带入弹性地基梁中梁的变形微分方程求解其纵向弯矩与应力, 或直接通过有限元进行求解。第二种方法采用梁单元模型, 将管线简化为梁单元模型。第三种方法采用壳单元或实体单元建立管土共同作用模型, 并进行三维数值模拟。本文采用第三种方法建立模型, 并采用 FLAC3D 中的壳单元“Liner”单元建立起管线计算模型。

本文针对主要影响因素进行分析, 分析中对模型作以下假定:

- (1) 同一土层中土是均匀的、连续的。
- (2) 土是各向同性的, 即在各个方向具有相同的物理性质。
- (3) 针对大面积卸荷, 不考虑围护结构对于变形的影响。

模型网格共设节点数量 59312, 划分网格单元数量 54308, 建立的“Liner”单元节点共 1466 个, 划分三角形壳单元共 2872 个, 计算规模较大。

模型底部设置限制三向位移, 模型左右两侧设置 y 方向位移, 模型前后两侧设置 x 方向位移。管线两端节点限制 x 方向的及 y_r 、 z_r 两个方向的转动自由度。计算模型见图 5~7。

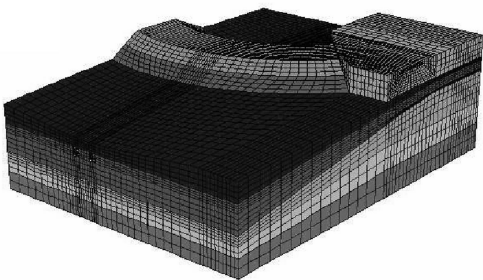


图 5 基坑围堰管线整体模型

Fig. 5 Whole model of excavation and pipelines

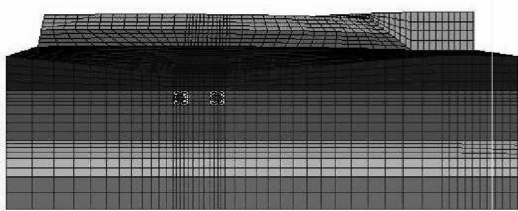


图 6 剖面模型

Fig. 6 Profile of numerical model

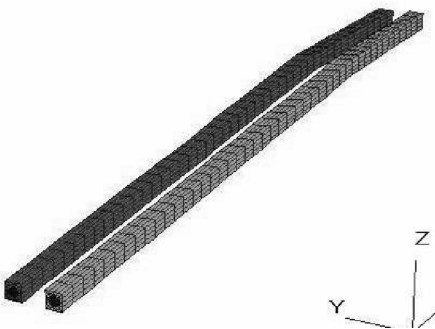


图 7 管线模型

Fig. 7 Numerical model of pipelines

5 计算结果

本文重点研究围堰填筑至设计高程对管线变形和附加应力的影响。

表 2 管线 1 管壁外侧最大截面应力数据汇总表

Table 2 Summary of maximum section stress of outside wall of pipeline No. 1

x/m	σ_{xx1}	σ_{xx2}	σ_{yy}	σ_{zz}	τ_{xy}	τ_{zy}	τ_{zx}	σ_{4max}	钢管强度 f	安全系数
5.11	50.5	-67.9	8.7	19.1	-1.58	12.98	-3.36	85.6	215	2.5
13.3	51.5	-67.0	10.3	22.6	-1.55	15.32	-3.21	88.5	215	2.4
25.5	46.2	-72.2	11.7	26.0	-1.24	17.54	-3.35	97.1	215	2.2
29.6	50.5	-68.0	12.2	26.8	-2.56	18.19	-4.85	94.4	215	2.3
33.7	67.2	-51.2	1.6	38.8	-1.49	7.88	-6.40	80.5	215	2.7
37.7	82.3	-36.2	1.9	46.6	-1.97	9.43	-6.77	74.7	215	2.9
41.8	94.9	-23.6	1.9	48.7	-1.83	9.77	-4.30	82.6	215	2.6
45.9	111.2	-7.3	-3.2	0.3	2.14	0.80	4.93	113.1	215	1.9
47.9	111.6	-6.9	0.1	0.6	1.72	0.20	5.88	111.8	215	1.9
49.9	108.6	-10.1	2.6	0.7	1.54	0.74	5.52	107.4	215	2.0
52.0	98.2	-20.6	1.6	42.2	-0.31	8.23	3.83	85.5	215	2.5
58.1	80.0	-40.3	1.2	31.8	-0.09	6.23	2.27	69.7	215	3.1
61.8	93.9	-26.3	24.1	11.7	-1.74	16.61	2.27	82.1	215	2.6
71.3	66.4	-51.9	1.0	27.2	-0.45	5.40	-2.00	70.6	215	3.1
79.19	67.0	-51.4	1.0	26.5	0.13	-5.26	-0.94	69.4	215	3.1
83.12	66.0	-52.3	1.1	26.5	-0.20	-5.29	0.79	70.4	215	3.1

5.1 管线沉降与变形

管线周边土层及管线沉降见图 8。管线顶部土层沉降大，底部沉降小。说明顶部土层沉降受到应力扩散和管线影响，沉降值明显降低。管线 1 管顶最大沉降值为 32.3 mm，管线 2 管顶最大沉降量为 30.89 mm，管线 1 沉降略大。这与管线 1 更靠近围堰中部有关。

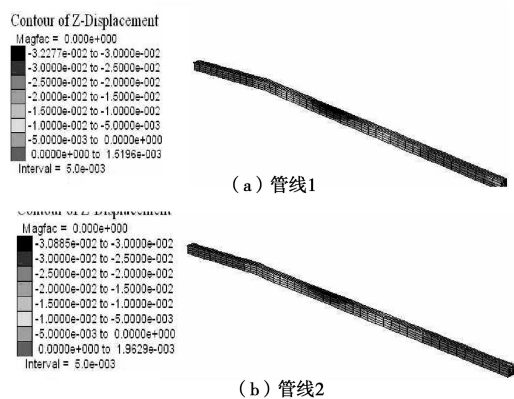


图 8 管线沉降变形场云图 (单位: m)

Fig. 8 Settlement deformation contour of pipelines (Unit: m)

将管线的管顶竖向位移数据导出绘制管线沉降图，见图 9。从图中可以看到，管线在围堰加载部位出现了正态分布曲线形式的槽形沉降，与目前的理论计算结果吻合。其中管 1 的最大沉降量为 29.83 mm，管段最大沉降斜率 0.21716%<0.6%；管 2 的最大沉降量为 28.05 mm，管段最大沉降斜率 0.19929%<0.6%。满足沉降控制标准。

5.2 管线应力计算与安全评估

利用 Liner 单元信息，将管线的正常工作状态下的三向应力数据导出，按照材料力学强度公式，计算管线的最不利应力。每隔一定距离提取了部分截面的管壁的应力值，并计算安全系数，见表 2。

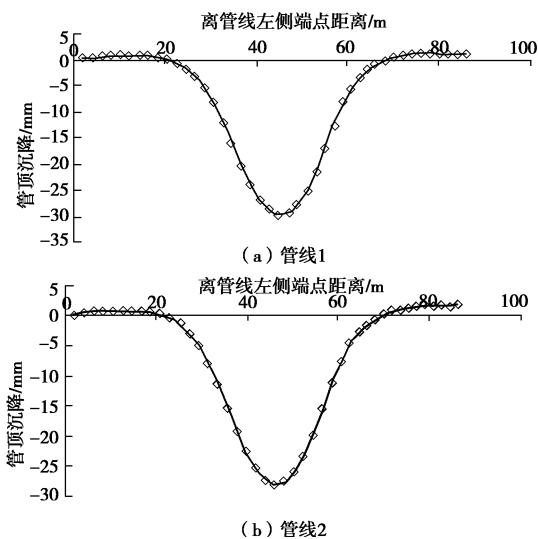


图 9 管线沉降

Fig. 9 Settlement of pipelines

各工况下管道应力计算结果汇总表见表 3。从表 1 中可以看到，最危险工况出现在工况四——真空压力作用工况下，最危险位置出现在管壁外侧。其中，管线 1 的最大应力达到 122.67 MPa，管线 2 最大应力达到 114.3 MPa，分别对应的安全系数为 1.75 和 1.88。

表 3 管道应力与强度安全评价结果汇总

Table 3 Summary of evaluation of stress and strength of pipelines

工况	管线编号及管壁位置	截面最大应力/MPa	管材强度/MPa	安全系数
内水压力 0.45	1 内侧	107.5	215	2
	1 外侧	113.13	215	1.9
	2 内侧	100.24	215	2.14
	2 外侧	107.47	215	2.0
真空压力	1 内侧	107.48	215	2.0
	1 外侧	122.67	215	1.75
	2 内侧	98.93	215	2.17
	2 外侧	114.3	215	1.88

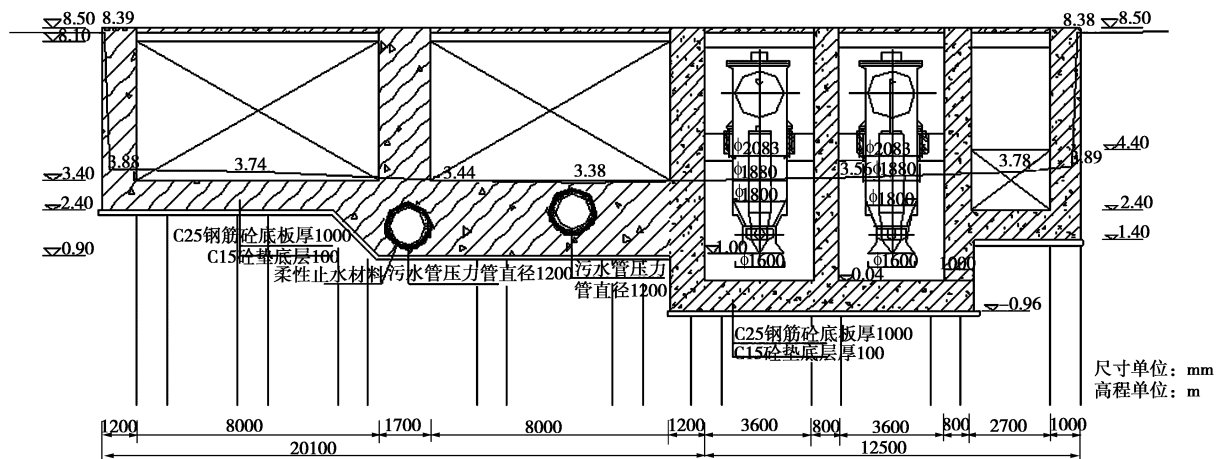


图 10 基础与管线之间相互位置关系

Fig. 10 Position relationship between pipelines and foundation

通过计算分析, 本管道在工程荷载影响下刚度和稳定性均符合规范要求。采用三维数值计算得到的管线应力, 并以第四强度理论计算相当应力, 其最大值为 122.67 MPa, 出现在堆载中心位置管线 1 管壁外侧, 亦小于 215 MPa。

6 基坑开挖、围堰与泵站基础下管线基础处理措施

6.1 围堰下管线保护措施

为了控制管线的沉降, 围堰位置在污水管线两侧布置旋喷桩, 形成复合地基, 在桩顶铺设一层土工格栅, 将围堰大部分荷载分摊给旋喷桩, 由桩传至桩周、端土层, 减少围堰荷载及人为荷载对管线的应力作用, 确保污水管线安全。根据围堰布置形式及其荷载分布, 对加固保护措施进行进一步优化, 荷载分布较小的部位采用短桩, 荷载分布大的部位采用长桩, 尽量减少处理费用, 节省成本。旋喷桩桩径 500 mm, 单管旋喷, 桩间距 1500 mm, 桩长 5~10 m, 具体布置见图 2 和图 4。

6.2 泵站基础下管线保护措施

管线位置在其基础底板内, 为了确保管线安全, 根据对管线的计算分析, 采取的管线保护加固措施: ①先在管线外侧包一层钢筋混凝土厚 100 mm, 主要是保护管线; ②再用有一定强度的柔性材料包一层, 主要是减少水闸底板对管线的振动或挤压等外力传递的不利影响, 且防止沿管侧渗水或漏水; ③采用桩基础支撑水闸及泵站底板, 桩端后注浆法, 使之桩端沉降接近零, 尽量不对管线产生挤压作用。如图 10 所示。

7 结 语

随着城市建设的飞速发展, 处于建筑物、道路和

地下管线等设施密集区的深基坑工程也日益增多, 深基坑工程开挖过程中, 在保证自身安全可靠的前提下, 必须保证周围地下管线的正常使用。本文以软土地基管线上基坑围堰和泵站基础施工为工程背景, 研究了软土地基深基坑围堰及基础施工对既有下穿管线的影响及保护措施, 分析方法和结果及保护措施可为类似工程借鉴。

参考文献:

- [1] 李大勇, 龚晓南. 软土地基深基坑工程邻近柔性接口地下管线的性状分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 77 - 80. (LI Da-yong GONG Xiao-nan. Response of jointed ductile pipeline to deep excavation in soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 77 - 80. (in Chinese))
- [2] 侯学渊, 刘国彬, 黄院雄. 城市基坑工程发展的几点看法[J]. 施工技术, 2000, 29(1): 5 - 7. (HOU Xue-yuan, LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong. Several views on the development of urban foundation work[J]. Construction Technology, 2000, 29(1): 5 - 7. (in Chinese))
- [3] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 109 - 115. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, YAO Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 109 - 115. (in Chinese))
- [4] 刘斯琴, 余晓琳, 颜全胜. 基坑开挖对下方既有地铁影响数值分析[J]. 广东土木与建筑, 2009(6): 19 - 20. (LIU Si-qin YU Xiao-lin, YAN Quan-sheng. Numerical simulation analysis for influence of overhead excavation on existing MTR[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009(6):

- 19 - 20. (in Chinese))
- [5] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. 同济大学学报, 2001, **29**(5): 531 - 534. (JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation[J]. Journal of Tongji University, 2001, **29**(5): 531 - 534. (in Chinese))
- [6] 李志高, 刘国彬, 曾 远, 等. 基坑开挖引起下方隧道的变形控制[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(3): 430 - 432. (LI Zhi-gao, LIU Guo-bin, ZENG Yuan, et al. Control measures of tunnel displacement by over-excavation unloading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(3): 430 - 432. (in Chinese))
- [7] GB 50332—2002 给水排水工程管道结构设计规范[S]. 2002. (GB 50332—2002 Structural design code for pipelines of water and waste water engineering[S]. 2002. (in Chinese))
- [8] GJB02—98 广州地区建筑基坑支护技术规定[S]. 1998. (GJB02—98 1998 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations in Guangzhou area[S]. 1998. (in Chinese))
- [9] CECS141: 2002 给水排水工程埋地钢管管道结构设计规程[S]. 2002. (CECS141: 2002 Specification for structural design of buried steel pipeline of water supply and sewerage engineering[S]. 2002. (in Chinese))
- [10] 李大勇, 龚晓南, 张土乔. 软土地基坑周围地下管线保护措施的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(6): 736 - 740. (LI Da-yong, GONG Xiao-nan, ZHANG Tu-qiao. Numerical simulation of the buried pipelines protection adjacent to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 736 - 740. (in Chinese))
- [11] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in-situ walls[C]// Design and Performance of Earth Retaining Structures, Proceedings of a Specialty Conference at Cornell University. New York: ASCE, 1990: 439 - 470.

(本文责编 明经平)