

深层平行双顶管对海堤沉降的影响分析

顾威, 曹坤, 邹恒, 王弘元

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 以东部沿海某达标尾水排海工程为例, 分别通过经验公式方法和数值方法模拟深层平行双顶管施工对海堤地表沉降值和影响范围进行对比分析。两种研究方法的计算结果显示土体的变形规律基本一致, 可为类似工程提供借鉴。

关键词: 深层平行双顶管; 海堤沉降; 数值分析

中图分类号: TV871

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)01-0131-03

0 引言

我国东南沿海为台风常登陆地区, 海堤受损情况屡有发生, 一旦海堤损毁往往会造成巨大的经济损失^[1]。穿越海堤堤身进行排海管顶管施工会扰动周围土层, 使地层原始应力发生改变和土体平衡状态遭到破坏, 对海堤的地表沉降、整体稳定、渗流等都将产生不利影响。顶管穿堤施工必须采取措施, 严格控制施工过程对于堤身各方面的不利影响。本文结合工程实例, 通过经验公式方法及数值模拟方法对顶管施工影响海堤的地表沉降进行研究分析, 为类似工程设计提供参考。

1 工程概况

浙江海盐某污水处理厂工程规模 20 万 m³/d, 尾水排放以铺设管道形式就近排入杭州湾, 排放管采用顶管施工, 管材采用 DN1800 钢管, 排放管需穿越钱塘江入海口北岸海堤, 相应区段堤顶高程 8.2 m, 海堤下方顶管中心标高为 -14.0 m, 顶管直径为 1.8 m, 两顶管中心距为 5.25 m。土层地质参数见表 1。

2 Peck 法海堤沉降分析

顶管施工对地面沉降受施工机械、施工工艺、土层性质、地下水和施工人员的素质、经验等条件影响, 影响因素较多, 计算条件较复杂。国内外对顶管施工引起的地面变形问题都做了大量研究, 目前 Peck 法在工程界得到广泛运用。

2.1 Peck 法计算顶管施工引起海堤沉降

Peck 法^[2]通过对大量地面沉降数据分析, 提出地面沉降槽呈拟正态分布的概念(见图 1), 认为土体移动由土体损失引起, 施工引起的地面沉降是在不排水、不固结、体积不可压缩的条件下发生的, 所以沉降槽体积应等于土体损失体积, 横向地面沉降估算公式为:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi}i} \quad (2)$$

式中: $S(x)$ 为距离顶管中心线 x 处的地表沉降, m; $S_{\max}$ 为顶管中心线处最大地面沉降, m; x 为距顶管中心线的距离, m; i 为沉降槽宽度系数, m, $i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi} \tan(45 - \frac{\varphi}{2})}$ (刘建航等), Z 为地面至顶管中心

深度, n 为指数参数, 通常取 0.8~1.0; 沉降槽半宽取 35 m; V_1 为顶管单位长度地层损失, m³/m, $V_1 = \pi r^2 \eta$, η 为土体损失百分率, 取 2%。

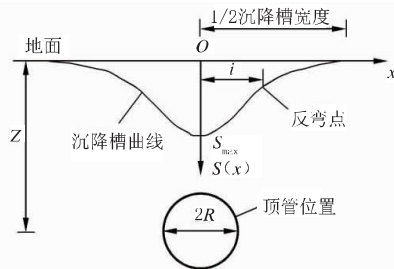


图1 顶管横向沉降示意图

2.2 修正 Peck 法计算双顶管施工引起海堤沉降

上述公式只能对单根顶管的沉降进行计算, 采用叠加原理对式(1)进行修正, 以计算两根顶管时地面的横向沉降(见图 2)。

收稿日期: 2020-05-28

作者简介: 顾威(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程、水利工程设计研究工作。

表1 土层地质参数

序号	材料	层底 高程/m	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量 /MPa	泊松比	水平渗透系数 /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	垂直渗透系数 /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	界面强度 折减因子
1	塘身填土	-1.29	18.0	9.0	0.32	0.230 7		10	18	1.0
2	粉土	-3.39	19.0	9.3	0.30	0.093 3	0.048 7	12	19	1.0
3	淤泥质粉质黏土	-8.13	18.3	3.2	0.35	0.000 7	0.003 9	18	14	1.0
4	淤泥质粉质黏土	-35.43	18.1	3.4	0.35	0.012 4	0.007 8	16	15	0.7

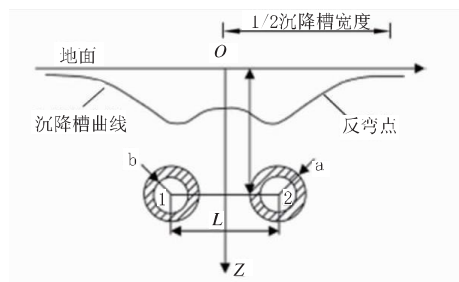


图2 平行顶管横向沉降示意图

L 为两根顶管的中心距,当两根顶管相距较远时,可不考虑两根管道相互影响;若两根相距较近时,必须要考虑两者之间的相互影响,在式(1)的基础上,根据叠加原理推导出如下公式来计算两根顶管时海堤地表的横向沉降。

当顶管施工a管时,此时的地面横向沉降公式为:

$$S(x) = S_{\max} \exp \left[-\frac{(x-0.5L)^2}{2i^2} \right] \quad (3)$$

两根顶管均施工完毕后,地面横向沉降公式为:

$$S(x) = S_{\max} \exp \left[-\frac{(x-0.5L)^2}{2i^2} \right] + S_{\max} \exp \left[-\frac{(x+0.5L)^2}{2i^2} \right] \quad (4)$$

运用Peck法及修正公式计算海堤堤顶处沉降值,堤顶沉降横向分布如图3所示。

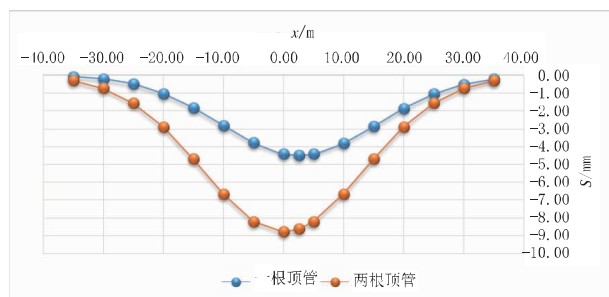


图3 顶管穿堤堤顶横向沉降曲线图(Peck法)

如图3所示,顶管施工后,海堤地表沉降对称分布,最大沉降出现在顶管中心处。单根顶管施工完成后,堤顶沉降为4.76 mm;平行双顶管施工完成后,堤顶最终最大沉降为8.79 mm。双顶管相较于单根顶管增大了堤顶的沉降值。

3 数值模拟法海堤沉降分析

随着有限元法和计算技术的发展,数值模拟法在预测分析顶管施工引起的地层变形中被广泛应用。有限单元法可以考虑地层结构,适应复杂边界条件,提供更为丰富全面的计算成果。

3.1 有限元模型的构建

构建数学模型模拟分析顶管施工对海堤所产生的影响,模型设置顶管直径为1.8 m,两顶管中心距为5.25 m。海堤顶管中心标高为-14.0 m,海堤堤顶标高现状为8.2 m。通过试算确定对海堤变形无明显影响时的模型边界取值范围,左、右侧边界自顶管中心线起均取40 m,下侧边界自堤顶以下取40 m。

地基土层主要包括四个土层,由上而下分别是①塘身填土、②粉土、③淤泥质粉质黏土、④淤泥质粉质黏土,更深部分则被看作完全坚硬,以合适的边界条件加以模拟。

顶管有限元模型中包含了土体、顶管等结构。其中土体采用Mohr-Coulomb本构模型;钢管采用线弹性模型;土-结构接触面采用界面单元模拟,钢管结构与土体在材料性质有较大差异,为了满足有限元理论位移协调原则,需要在两种材料之间加设界面单元。通过加设界面单元的方式可以有效模拟钢管与土体之间的相对位移。

土孔隙水压力分布是静态水压,水位高程取其平均高潮位,为2.55 m。海堤堤顶沉降的计算模型如图4所示,模型采用15节点单元为基本单元类型,共有266个单元、2 245个节点。

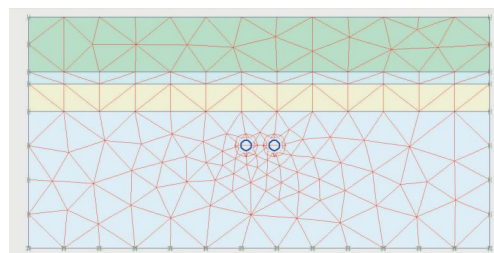


图4 海堤堤顶沉降的计算网格图

3.2 数值模拟计算分析

根据顶管施工的先后次序,数值模拟分为两步。

3.2.1 第一条顶管施工后的地表沉降

数值模拟计算结果如图 5 所示:第一条顶管施工后,海堤地表沉降沿顶管对称分布,最大沉降出现在顶管中心轴线处,顶管上方的地层沉降随深度增加而增加,在接近顶管顶端位置达到最大,顶管下方土体沉降较周围土体变小。顶管轴线正上方地表沉降最大,向左右沉降分别逐渐减小,最大沉降为 3.63 mm。

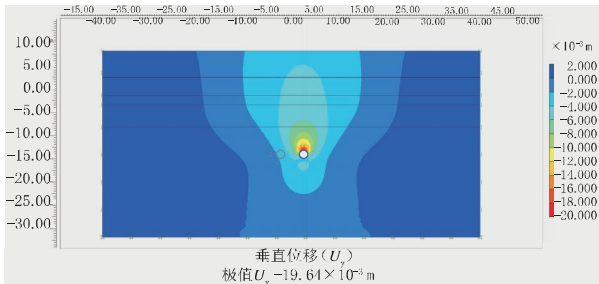


图 5 第一条顶管施工后模型竖向位移图(云图)

3.2.2 第二条顶管施工后的地表沉降

数值模拟计算结果如图 6 所示:第二条顶管施工后,海堤地表沉降对称分布,最大沉降出现在两顶管中心位置,顶管上方的地层沉降随深度增加而增加,在接近顶管顶端位置达到最大,在顶管下方土体局部沉降减小。平行双顶管中轴线正上方地表沉降最大,向左右沉降分别逐渐减小,两根平行顶管对于地表沉降具有部分重叠影响,最大沉降为 7.14 mm。

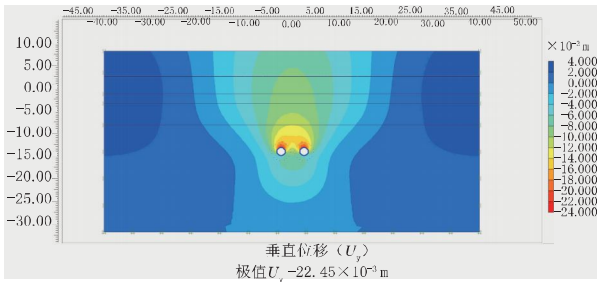


图 6 第二条顶管施工后模型横向位移图(云图)

4 数值分析法与 Peck 法对比分析

通过以上两种方法计算可以发现,无论是单顶管还是平行双顶管,数值分析法和 Peck 法计算结果显示土体的变形规律是一致的,海堤地表沉降呈对称分布,最大沉降值均发生在管道中心轴线处,向左右沉降分别逐渐减小(见图 7)。

平行双顶管引起地表沉降最大值两种计算方法的结果比较,数值分析法比 Peck 法小 18.8%。Peck 法出于简化公式的原因,未能考虑地质参数等因素,导致结果有差异。

平行双顶管引起海堤地表沉降影响宽度两种计算方法结果略有不同,根据刘建航沉降槽影响宽度

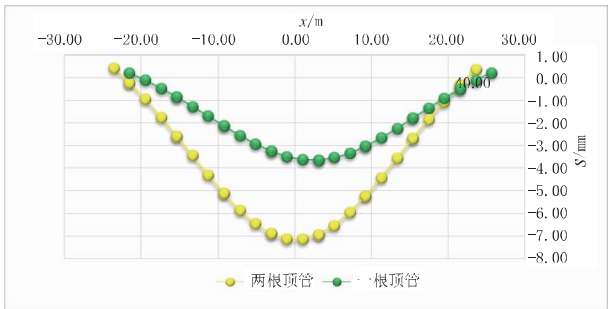


图 7 顶管穿堤顶横向沉降曲线图(数值分析法)

系数计算公式得到的沉降槽影响半宽约 35 m,而数值分析法得到的沉降影响半宽约 25 m(见图 8)。

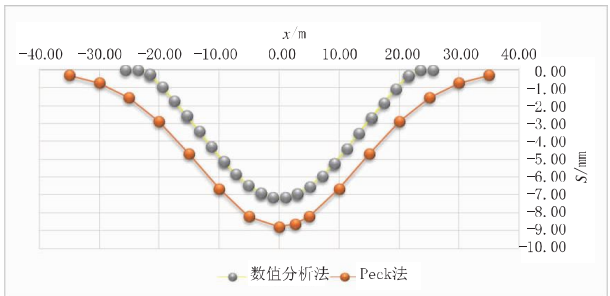


图 8 平行双顶管穿堤顶横向沉降曲线对比图

5 结 语

通过沉降经验公式、有限元数值模拟等研究手段计算分析了深层双顶管施工对海堤的影响,得到以下结论:

(1)顶管施工引起的海堤地面沉降受多种因素的影响,主要有顶管覆土厚度、顶管外径、开挖面压力、地层物理力学性质、施工条件等^[2],根据规律,顶管穿堤工程可制定对海堤影响较小的方案。

(2)平行双顶管施工土体位移规律:第一根顶管施工后,钢管左右土体有靠近顶管的水平移动;土层沉降对称分布,最大沉降出现在顶管中心轴线处,顶管上方的地层沉降随深度增加而增加,在接近顶管顶端位置达到最大,在顶管下方土体的位移随着土层损失率的增大而增大,顶管下方垂直位移可能会由向下变为向上,接近管底的地方最大。第二根顶管施工时对于土体的独立影响规律与第一根顶管相似,叠加作用导致两顶管之间区域受到双重扰动,产生的海堤地表沉降较大。随着平行顶管中心间距的增大影响逐渐减小。

(3)深层顶管引起海堤地表的沉降较小,沉降呈对称分布,平行管道中轴线正上方地表沉降最大,向左右沉降分别逐渐减小。通过 Peck 法计算和有限元数值模拟计算横向地表沉降,两种研究方法的计算结果显示土体的变形规律基本一致,相互印证了两种方法的合理性。Peck 法出于简化公式的原因,未

(下转第 180 页)

- lishers, 2006.
- [9] DONG P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(10):865-876.
- [10] DONG P, HONG J K, OSAGE D A, et al. Master $S-N$ curve method for fatigue evaluation of welded components [J]. Welding Research Council Bulletin, 2002(474):1-44.
- [11] DONG P, PRAGER M, OSAGE D. The design master $S-N$ curve in ASME div 2 rewrite and its validations [J]. Welding in the World, 2007, 51(5-6):53-63.
- [12] 刘旭,张开林,姚远,等. 基于缺口理论的复杂焊接结构疲劳分析方法[C]//第23届全国结构工程学术会议论文集.兰州:[s.n.], 2014: 190-197.
- [13] ATZORI B, LAZZARIN P, MENEGETTI G. Fatigue strength assessment of welded joints: From the integration of Paris' law to a synthesis based on the notch stress intensity factors of the uncracked geometries [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(Suppl 3-4):364-378.
- [14] TAYLOR D, BOLOGNA P, KNANI K B. Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(9):735-742.
- [15] NEUBER H. Theory of notch stresses: Principles for exact stress calculation[M]. Ann Arbor (MI): J W Edwards, 1946.
- [16] RADAJ D. Design and analysis of fatigue resistant welded structures[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 1990.
- [17] NISITANI H, TERANISHI T. The K_I value of a circumferential crack emanating from an ellipsoidal cavity obtained by the crack tip stress method in FEM [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(4):579-585.
- [18] HADDAD M H E, DOWLING N E, TOPPER T H, et al. Integral applications for short fatigue cracks at notches [J]. International Journal of Fracture, 1980, 16(1):15-30.
- [19] TAYLOR D. A mechanistic approach to critical - distance methods in notch fatigue [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001, 24(4): 215-224.
- [20] CRUPI G, CRUPI V, GUGLIELMINO E, et al. Fatigue assessment of welded joints using critical distance and other methods [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(1):129-142.
- [21] ANDERSON T L. Fracture mechanics: Fundamentals and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [22] ANSYS Inc. ANSYS mechanical APDL fracture analysis guide [M]. Pittsburgh: ANSYS Inc, 2016.
- [23] 童乐为,顾敏,朱俊,等. 基于断裂力学的圆钢管混凝土 T 型焊接节点疲劳寿命预测[J]. 工程力学, 2013(4):331-336.
- [24] 李录贤,王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学进展, 2005, 35(1):5-20.
- [25] NAGY W, VAN BOGAERT P, DE BACKER H. LEFM based fatigue design for welded connections in orthotropic steel bridge decks[J]. Procedia Engineering, 2015, 133: 758-769.
- [26] LAZZARIN P, TOVO R. A notch intensity factor approach to the stress analysis of welds [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1998, 21(9):1089-1103.

~~~~~  
(上接第 133 页)

能考虑地质参数等因素,计算结果比数值分析法较大。

(4)Peck 法沉降槽宽度影响系数并未考虑土层的分层沉降、地质条件等因素,需要结合实际情况,评估顶管施工的影响范围。

#### 参考文献:

- [1] 张丽佳,刘敏,陆敏,等.中国东南沿海地区台风危险性评价[J].人民长江,2010,41(6):81-83.
- [2] 韩国良.顶管施工引起的地面变形问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.