

施工与监理

## 震动及挤土效应下的污水干管保护方案及实证分析

万玉生<sup>1</sup>, 李昌耀<sup>2</sup>, 骆侃<sup>3</sup>, 倪国军<sup>2</sup>, 陈用锦<sup>2</sup>, 叶雅丽<sup>1</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 杭州萧宏建设环境集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 3. 杭州水务控股集团有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 沉管灌注桩及振冲碎石桩施工时具有震动及挤土效应,当邻近污水主干管距离打桩点较近时,有必要对邻近污水主干管采取保护措施。根据工程实际状况,提出注浆法、隔震沟法、应力释放孔法等三种消除或减弱震动及挤土效应的方案,通过方案对比选择较佳设计方案,并在施工现场进行震动及挤土效应监测,对监测数据进行分析。根据实测及分析结果,提出消除震动及挤土效应的方法,可为其他类似工程实施提供借鉴。

**关键词:** 震动; 挤土; 隔震沟; 应力释放孔

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)12-0130-05

### Protection Scheme and Empirical Analysis of Main Wastewater Pipeline under the Effect of Vibration and Soil Compaction

WAN Yu-sheng<sup>1</sup>, LI Chang-yao<sup>2</sup>, LUO Kan<sup>3</sup>, NI Guo-jun<sup>2</sup>, CHEN Yong-jin<sup>2</sup>, YE Ya-li<sup>1</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Hangzhou Xiaohong Construction Environment Group Co. Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Hangzhou Water Holding Group Co. Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Both tube-sinking cast-in-situ pile and vibro replacement gravel pile have soil vibration and compaction effect. When the distance between the main wastewater pipe and the pile point is relatively close, it is necessary to take measures to protect the main wastewater pipe under the vibration and soil compaction effect. According to the actual situation of the project, three ways to eliminate or weaken the vibration and soil compaction effect are proposed, such as grouting method, isolation ditch method and stress release hole method. After comparison of the schemes, the optimized design is selected, and the vibration and soil compaction effect is monitored in the construction site. Furthermore, the monitoring data are analyzed at the same time. According to the measured and analyzed results, the method for eliminating vibration and soil compaction effect is proposed, which can provide references for other similar projects.

**Key words:** vibration; soil compaction; isolation ditch; stress release hole

沉管灌注桩及预制桩等沉桩时具有挤土效应及震动效应<sup>[1,2]</sup>。当沉桩距离已有建筑物或构筑物较近时,应考虑沉桩的挤土效应及震动效应对周边环境的影响,应分析不同距离、不同深度的沉桩施工对

已建工程的影响。

目前,国内对沉桩的震动效应研究较少,对挤土效应分析一般基于理想弹塑性假定的 Vesic 扩孔理论<sup>[3,4]</sup>,刘裕华等<sup>[5]</sup>应用圆柱孔扩张理论对预制空

心管桩的挤土效应进行了弹塑性分析,结果表明各层土的塑性影响的平均塑性半径一般为桩身半径加1~2 m,此范围之外为弹性区,挤土桩的水平向挤土影响范围随桩径增加而增大,且主要影响范围在20~25倍桩直径内。

现有的研究大多没有考虑群桩效应的影响,实际桩基工程大多为群桩基础,需要考虑群桩效应影响。在不同工程地质条件下,不同施工桩长,不同沉桩方式都具有不同的挤土效应及震动效应。因此,实际工程需综合现场条件,以理论计算为指导,结合施工现场实际,采取措施消除挤土效应、震动效应对已建工程的影响,并结合实际工程监测,实现信息化施工,确保挤土效应及震动效应对已建工程的影响在可接受范围之内。

## 1 工程概况

杭州七格污水处理厂四期工程采用地下式钢筋混凝土结构,设计规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主体箱体结构平面占地尺寸约为 $190 \text{ m} \times 330 \text{ m}$ ,主体结构设计高度为14.5 m,顶部设计覆土深度为1.5 m,设计覆土顶部高程为13.1~13.6 m(1985国家高程基准),基底埋置深度为11.5 m。

### 1.1 场地环境

本工程平面位置见图1,其中厂区边界下侧为已建并运行的七格污水处理厂前期(一期、二期及三期)工程,四期工程与前期工程之间的分隔带内埋设了前期工程的污水进水主干管,负责将杭州市约50%的污水输送至七格污水处理厂各前期工程,主干管包括DN2 200的PCCP管(一期工程进水主干管埋深为6.7 m)、DN1 800钢筋混凝土管(二期工程进水主干管埋深为6.5 m)、DN1 400钢管(三期工程进水主干管埋深为1.4 m)。

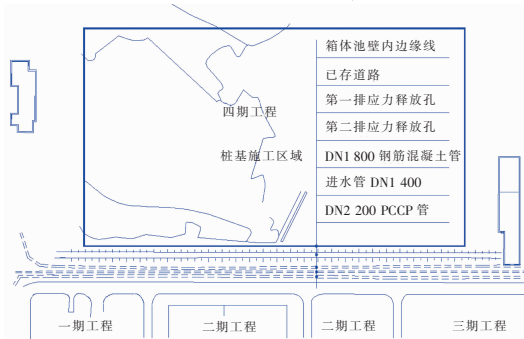


图1 桩基施工区域及主干管平面位置

Fig. 1 Pile foundation construction area and plan of main pile

## 1.2 场地工程地质、水文条件

该污水厂具有代表性的地质剖面图见图2,场地抗浮设防水位为6.50 m(1985国家高程)。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),本工程设计基本地震加速度值为 $0.10g$ ,根据该标准中表D1“地震动峰值加速度分区与地震基本烈度对照表”,本工程场地抗震设防烈度为7度。在7度条件下,其中②<sub>1</sub>层砂质粉土及②<sub>3</sub>层砂质粉土会产生中等液化。

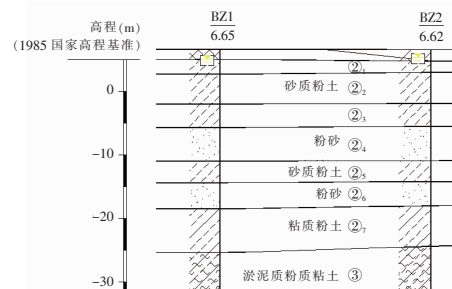


图2 典型工程地质剖面图

Fig. 2 Typical geologic section

## 1.3 桩基工程设计方案

该工程液化土层较薄,且在标高-25.0 m以下存在软弱下卧层,经济分析表明不宜采用长螺旋钻孔压灌桩等具有抗拔能力并具有抗液化能力的桩基作为抗地基液化桩型,因而采用振冲碎石桩消除地基液化<sup>[1,2]</sup>。

该工程设计对沉管灌注桩、长螺旋钻孔压灌桩、旋挖成孔灌注桩<sup>[1]</sup>进行优劣对比。结合前期工程施工状况、杭州地区常用桩型及该地区的实际工程经验,设计选取沉管灌注桩作为该工程抗拔桩。

该桩基工程共布置直径为 $\varnothing 426 \text{ mm}$ 的沉管灌注桩约13 000根,平均有效单根桩长为14 m,布置直径为 $\varnothing 800 \text{ mm}$ 的振冲碎石桩共15 000根,平均有效单根桩长为4.5 m,布桩间距根据现场设计试桩结果确定为2.2~2.5 m。

## 2 防挤土、防震动方案及比较

该工程桩基设计方案为“沉管灌注桩+振冲碎石桩”,其中沉管灌注桩主要用来解决工程抗浮问题,振冲碎石桩用来解决地基液化问题。

该工程桩基与现状3根主干管最近直线距离约20 m。杭州市大部分污水通过该污水干管进入七格污水处理厂,主干管重要性等级类同于城市供水,主干管如果受到施工影响而发生输水故障,将影响整

个杭州市的污水处理。因此,有必要分析桩基施工对该干管的影响,采取合适、经济的保护措施,将桩基施工对污水干管的影响大幅降低。

## 2.1 主要影响因素分析

### 2.1.1 振冲碎石桩的影响

该工程振冲碎石桩施工采用振动水冲法。振动水冲法成孔时,由于水的阻尼作用,以及震动时砂性土变成松散状态,对震动的阻尼较大,产生的震动较小。由于采用碎石挤密周边液化土层,且碎石置换率较大,因此振冲碎石桩的挤密作用较大。

### 2.1.2 沉管灌注桩的影响

该工程沉管灌注桩施工采用静压振动沉管法,桩基静压力较大,震动频率较高,钢管强行将成孔位置的土体挤开,需要较大的冲击能量,因此,相对于振冲碎石桩施工,沉管灌注桩施工产生的震动较大。

沉管灌注桩施工是在振冲碎石桩施工完毕后进行,且碎石桩已经挤密了周边土层,因此沉管灌注桩

施工时,具有挤土叠加效应,此时的挤土效应最大。

根据查阅有关资料,一般桩基施工时,震动及挤土效应主要影响半径为40 m,“沉管灌注桩+振冲碎石桩”与主干管最近距离为20 m,因此有必要对震动和挤土两种影响采取相应措施。

## 2.2 震动和挤土影响对应措施

针对以上两种类型桩基震动和挤土对主干管的影响,解决措施可分为两类方法,其一为“堵”法,其二为“疏”法。“堵”法是通过加强主干管周边土体刚度,将主干管周边土体形成“坚固”的一个整体,抵抗桩基施工时传来的震动和挤压。“疏”法是在桩基施工时震动和挤压传输路径上,采取措施将传输路径改变或截断,将震动和挤压不能传递到主干管上或尽量少地传递到主干管上。

### 2.2.1 注浆法

“堵”法采用注浆法,沿主干管靠近打桩区域一侧一定范围内土体进行注浆加固,具体见图3。

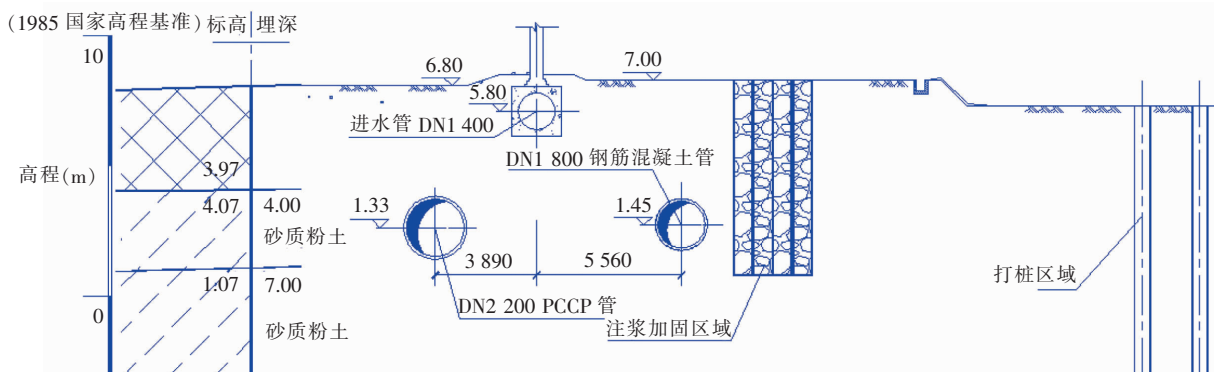


图3 注浆范围与主干管剖面关系

Fig. 3 Section diagram of grouting range and main pile

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)以及《既有建筑地基基础加固技术规范》(JGJ 123—2000)并结合现场实际情况,本次注浆加固深度取7.0 m,注浆孔间距为0.75 m,注浆扩散半径暂定为0.6 m,注浆施工前应进行现场注浆试验,以确定最优的扩散半径。

该工程采用P. O32.5水泥作为溶液的悬浮材料,水泥浆的水灰比取0.6~0.9,采用初始注浆压力为0.1~0.2 MPa,稳定压力为0.3~0.5 MPa。当注浆量不能满足浆液扩散半径要求时,调整注浆压力至1.0 MPa,注浆的流量可取7~10 L/min。单位孔深注浆水泥用量为80 kg/m。

注浆检验应在注浆结束28 d后进行,可选用标准贯入、轻型动力触探或静力触探对加固地层进行

检测。注浆检验点可为注浆孔数的2%~5%。当检验点合格率 $\leq 80\%$ ,或虽大于80%但检验点的平均值达不到强度或防渗设计要求时,应对不合格的注浆区实施重复注浆。

### 2.2.2 防挤土隔震沟法

防挤土隔震沟法是一种“疏”法,通过隔震沟的较大变形能力,大幅降低传递到主干管上的震动和挤土效应。防挤土隔震沟(见图4)采用拉森IV型钢板桩支护开挖,其施工步骤为先打入钢板桩,然后开挖防挤土隔震沟,随挖随施工钢板桩顶部支撑。防挤土隔震沟布置在图3中注浆加固区域,沟深拟定为6.5 m,沟底深度低于所需保护的主干管埋置深度,以防打桩引起的浅层震动直接传播到主干管上。该工程中的隔震沟内不填塞任何填料,更好地起到



防挤土及隔震效果,但需要在沟的顶部安装安全防护装置,施工交通组织上需要进行一些特殊处理。

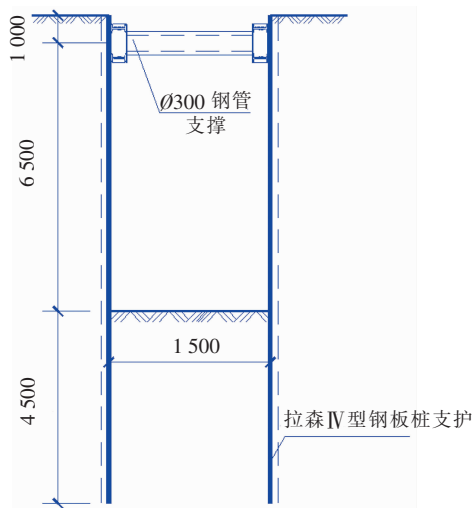


图4 防挤土隔震沟剖面

Fig. 4 Section of anti compacting soil and isolation ditch

### 2.2.3 应力释放孔法

应力释放孔也是一种“疏”法,设置应力释放孔的目的就是要释放沉桩过程产生的挤土应力和消散超静孔隙水压力。通过双排布置应力释放孔,当震动和挤土效应传播到应力释放孔位置时,应力释放孔的较大变形能力将部分消除震动和挤土效应,并阻断震动和挤土效应的传播。本工程应力释放孔布置见图5,双排布置应力释放孔,孔径为600 mm,孔深为18 m,两排孔间距为1.5 m,相间排列。

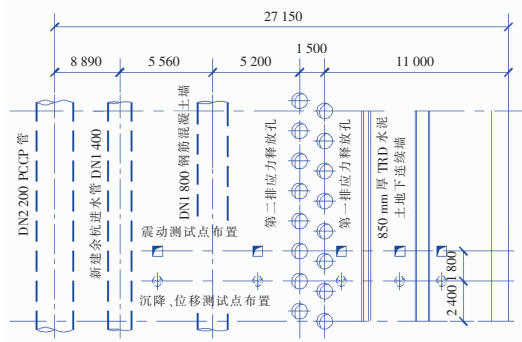


图5 震动、沉降、位移测试点布置

Fig. 5 Plan of test points for vibration, subsidence and displacement

为检验应力释放孔对震动和挤土效应的减弱效果,设计要求在沉桩期间对应力释放孔前后设置监测点,对沉桩不同距离处的沉降、位移,以及震动产生的最大土层加速度进行监测。该方案中,在应

力释放孔邻近保护的主干管一侧设置防挤沟,防挤沟宽度为2 m,深度为2 m,以阻断沉桩过程表面土体应力传播,减小沉桩过程产生的应力直接对埋深较浅的DN1400主干管的水平冲击。

### 2.3 方案对比

注浆法是依赖自身刚度抵抗桩基施工时传来的震动和挤压,但本工程桩基数量巨大,且碎石桩和沉管灌注桩具有双重挤土效应,因此,依赖自身刚度进行抵抗挤土效应,需要加固后的土体刚度很大,且加固后需要达到的刚度数值难以量化。另外,注浆法施工临时破坏了主干管周边土体,存在一定安全隐患。注浆法加固后形成的加固体是一个脆性破坏体系,一旦遇到较大挤土效应时,容易发生事先难以监测的脆性破坏,具有突然性。

隔震沟作用大小依赖其本身的变形能力,变形能力要求隔震沟内的填充骨料在填充后保持松散状态,因此,隔震沟拟采用非级配的大直径碎石作为填充材料,以确保变形能力,达到减震作用,基本消除挤土效应。由于隔震沟开挖深度一般不超过9 m,因此,隔震沟只能消除基础埋置较浅的挤土、震动效应,对埋深较大的污水主干管进行隔震时不宜采用。

应力释放孔可以采用钻孔或挖孔法成孔,成孔深度可达20 m以上,因此,应力释放孔能消除较深土层处的挤土、震动效应。该工程中应力释放孔法采用双排布置,在挤土及震动传播路径上还有部分连续的土层,因此只能起到消除大部分挤土和震动效应的作用。

经济测算表明,注浆法费用最高,隔震沟法费用略小于应力释放孔法。最终确定采用应力释放孔法减弱桩基施工期间的震动及挤土效应,保护污水主干管。

## 3 挤土、震动数值监测分析

本工程中的污水主干管保护措施不能彻底消除震动和挤土效应影响,在采取对应的保护措施后,仍然需要对主干管附近的土层进行位移、沉降等监测,一旦发生监测数据异常情况,应及时采取进一步的减震减挤土措施。

### 3.1 挤土效应数值监测分析

本工程沉桩期间,由监测单位跟踪监测污水主干管附近土层的变形及进行裂缝观测,土层垂直变形监测结果见表1。可以看出,桩基施工期间土层最大垂直变形量为12.65 mm,单个监测点最大平均

垂直变形量为 10.69 mm, 小于监测方案设定的报警值 ( $\pm 20$  mm)。施工期间未发现明显土层裂缝, 说明采用应力释放孔方法得当, 污水主干管处土层受挤土效应影响而产生的变形在安全范围内。

表 1 土层垂直变形量

Tab. 1 Accumulated vertical deformation of the soil mass

次数	测点				
	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
1	+11.91	+9.61	+6.61	+2.53	+1.85
2	+10.95	+10.43	+5.43	+3.41	+1.52
3	+8.63	+8.51	+5.51	+2.72	+0.85
4	+12.65	+9.89	+5.89	+2.59	+1.65
5	+9.32	+8.55	+6.55	+3.12	+1.43
均值	+10.69	+9.40	+6.00	+2.87	+1.46

注: 向上变形为“+”。

### 3.2 震动效应数值监测分析

本工程沉桩期间, 由监测单位跟踪监测污水主干管附近震动效应, 监测结果见表 2。

表 2 DASP 数据系统和处理系统测试结果

Tab. 2 Test results obtained by the DASP data and processing system

测点编号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
均值	3.29	0.37	0.29	0.25	0.15

由表 2 可以看出, 打桩时所引起的质点振动加速度随着与震源距离的增大而急剧衰减, 震动效应途经应力释放孔时产生急剧衰减。

对照中国地震烈度与对应地震峰值加速度数值可知, 在本工程沉管灌注桩施工时, 距离沉桩位置 15 m 范围内, 产生的地震峰值加速度可达到地震烈度为 7~8 度时的同等峰值加速度。因此, 有必要对污水主干管采取相应保护措施。应力释放孔消除震动效果显著, 经由应力释放孔后, 最大地震峰值加速度小于地震烈度为 5 度时的同等峰值加速度。结合该地区抗震设防等级, 采取应力释放孔后不会因震动效应对污水主干管产生震动破坏作用。

## 4 结论

① 具有挤土、震动效应的桩基施工时, 在该工程地质条件下, 当沉桩深度为  $l_0$  时, 在  $l_0 \sim 2l_0$  半径范围内的挤土效应及震动效应影响较大, 有必要采取防挤土、防震措施对已有建构筑物进行保护。

② 采用注浆法是依赖自身刚度抵抗桩基施工时传来的震动和挤压, 当工程桩基数量巨大, 且采用

碎石桩和沉管灌注桩具有双重挤土效应时, 土体加固后要达到的刚度数值难以量化, 因而注浆法不宜在该工程及类似工程中采用。

③ 隔震沟较注浆法更适合于主干管保护, 能消除基础埋置较浅的挤土作用、震动作用。但管道埋深较大时, 不宜采用。

④ 应力释放孔法可以作用到较大土层深度, 管道埋深较大时也能发挥作用, 且应力孔可重复使用, 施工方法成熟可靠, 可在类似工程中普遍使用。

⑤ 隔震沟、应力释放孔不能彻底消除震动和挤土效应影响, 采用隔震沟、应力释放孔保护措施后, 仍需要对主干管附近土体进行位移、沉降等监测, 做到信息化施工。

## 参考文献:

- [1] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 王兴隆, 陈雷, 窦丹若. 打桩挤土的现场试验研究及土体位移的计算公式[J]. 岩土力学, 2003, 24(S): 175-179.
- [4] 汪鹏程, 朱向荣. 沉管灌注筒桩施工挤土效应分析与比较[J]. 科技通报, 2005, 21(2): 185-188.
- [5] 刘裕华, 陈征宙, 彭志军, 等. 应用圆柱扩张理论对预制管桩的挤土效应分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2167-2172.



作者简介: 万玉生(1972—), 男, 安徽庐江人, 高级工程师, 从事结构专业设计工作。

E-mail: 13802010979@163.com

收稿日期: 2017-02-24