

振挤碎石桩处理液化地基问题原因分析及对策

陈正元¹ 柴朝生²

1 河南省地热能开发利用有限公司, 河南 郑州 450053

2 河南省地质局生态环境地质服务中心, 河南 郑州 450003

[摘要] 对某水厂振动沉管碎石桩(也称振挤碎石桩)下料困难和断桩问题进行了分析, 从沉管成孔引起土体液化导致管底流动土体压力大于管底干碎石柱净压力, 导致干碎石无法下料和断桩问题, 提出了采用振动沉管气冲法、锤击法、振动沉管饱和碎石成桩法, 解决了碎石桩下料问题。

[关键词] 振动沉管; 碎石桩; 超孔隙水压力; 液化

DOI: 10.33142/ec.v6i9.9395

中图分类号: TD472.32

文献标识码: A

Reason Analysis and Countermeasures for Liquefied Foundation Treatment with Vibrating Crushed Stone Piles

CHEN Zhengyuan¹, CHAI Chaosheng²

1 Geothermal Energy Development and Utilization Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450053, China

2 Ecological Environment Geological Service Center of He'nan Geological Bureau, Zhengzhou, He'nan, 450003, China

Abstract: An analysis was conducted on the difficulty in cutting and breaking of the vibrating immersed tube gravel pile (also known as the vibrating crushed stone pile) in a certain water plant. The problem was solved by using the vibrating immersed tube air impact method, hammering method, and vibrating immersed tube saturated crushed stone pile formation method, which caused the soil liquefaction at the bottom of the tube to cause the soil pressure to be greater than the net pressure of the dry crushed stone column at the bottom of the tube, resulting in the inability to cut and break the dry crushed stone pile.

Keywords: vibration immersed tube; gravel pile; excess pore water pressure; liquefaction

1 工程地质与设计概况

某水厂位于郑州东部黄河冲积平原上, 设计日供水能力 20 万吨, 地势较平坦, 其吸水井部位自然地面标高 91.39m 左右。吸水井长 49m, 宽 3m, 基底标高 86.89m, 基坑深约 4.5m。1998 年下半年完成厂区地基处理的设计与施工。

依据地勘资料, 吸水井部位地层如下:

第①层: 耕植土, 褐黄略灰, 以粉土为主, 含较多植物根系。厚度 0.4~0.6m。

第②层: 粉土, 浅褐黄色, 稍湿, 中密。含植物根系, 土质均匀。顶板埋深 0.4~0.6m, 厚度 1.5~2.1m。

第③层: 粉土, 褐黄色, 黄褐色, 饱水, 中密。夹少量灰色粉土条带, 黏粒含量略有变化。顶板埋深 2.0~2.5m, 厚度 3.3~4.2m。吸水井基底位于该土层中。

第③₁层: 粉砂, 褐黄色, 饱水, 中密。含较多泥质、贝壳碎片, 顶板埋深 4.9~6.0m, 厚度 0.3~1.1m。

第④层: 粉土, 灰色、深灰色, 色调不均, 饱水, 中密。局部夹粉砂, 含腐植质、贝壳碎片。顶板埋深 6.0~7.6m, 厚度 5.0~5.7m。

第⑤层: 细砂、粉砂, 灰色, 饱水, 中密。含少量泥质、贝壳碎片。砂的主要成分: 长石、石英, 云母, 颗粒呈次棱角状, 分选性良好。顶板埋深 12.0~12.7m, 厚度

1.5~2.7m。

第⑥层: 粉质黏土: 灰色, 黑色, 可塑—硬塑状。土质不均, 局部贝壳碎片富集。夹粉砂薄层, 含钙质结核($d < 0.5\text{cm}$)及黄褐色斑。顶板埋深 13.8~14.0m, 本层未揭穿。

郑州市地震烈度按 7° 设防^[1], 结合水厂规模判定水厂构筑物抗震设防类别为乙类^[2]; 按规范^[3]计算得到的液化指数, 判定该场地属中等液化, 局部地段为严重液化。其中②、③、③₁、④、⑤层均为液化土层。勘察和施工期间, 拟建场地地下水位埋深分别为 4.0m、2.0m 左右

15m 以上土层平均饱和容重为 19KN/m^3 。

设计单位依据抗震规范^[3]要求采用碎石桩进行地基处理以全部消除地基液化。吸水井部位具体设计为: 桩径 0.5m, 桩长 10m (含设计桩顶以上的 1m 浮桩), 桩入土深度约 13.5m, 要求采用 2~5cm 碎石, 最大粒径不超过 5cm 且含泥量 $< 5\%$, 每米投石量不少于 0.3m^3 。

2 施工过程中及验槽时发现的问题

碎石采用石灰岩质, 拉入现场后经监理表观检验, 未发现碎石风化, 粒径也满足设计要求。在监理监督下随机取样进行室内试验, 表观密度 2720kg/m^3 , 堆积密度 1500kg/m^3 。

正式施工前, 先在吸水井部位进行振挤成桩试验, 桩

机型号为 DZ-60, 管径 426mm, 管长 13.5m, 分别采用锥形活瓣桩基、平底半开(全开)桩间进行试验。沉管至设计深度后, 将碎石灌满桩管, 留振 1min, 碎石振密后顶面略有下降, 反算管内碎石堆积密度为 1550kg/m³, 饱和密度 1990kg/m³, 继续灌满桩管后振动上提桩管, 碎石顶面不下沉, 三种桩尖均无法打开, 碎石料不出管, 反插后仍然如此, 将桩管内碎石加满水饱和后, 重复上述过程, 桩尖均可打开。正式施工时采用加水法打开锥形桩基成桩。施工中后期地面潮湿变软, 水位以上土体接近饱和状态, 需放方木才能支撑桩机设备, 同时地面也逐渐下沉至 30~50cm, 施工实际投石量平均每米 0.31m³。桩身检测发现 4.8~8.3m 桩身不明显。

管井降水至基底下 0.5m, 基坑按设计坡率和基底标高全部开挖后, 基底褐黄色粉土内未见碎石桩, 仅在设计桩位处看到直径略大于 426mm 的下层灰色粉土圆圈, 在基坑侧壁看到直径大于 500mm, 上部略细的陀螺型碎石桩, 碎石桩底部接近基底。

3 产生问题的原因

3.1 沉拔管过程中超孔隙水压力与液化土压力

振动沉管过程中, 钢管对土产生挤压作用, 在桩管附近产生了很高的孔隙水压力^[4], 孔隙水压力随深度增加而增加^[5-6], 随着振动荷载的持续作用, 超孔隙水持续增加, 当其等于土体有效应力时, 土体发生液化^[7], 土压力变成各向同性的压力, 其值等于土的天然容重乘上埋置深度。

3.2 沉拔管过程中管底受力分析(见图 1 碎石桩管底受力分析图)

管内干碎石时:

$$F_1 - F_2 - f = \pi/4 \times d^2 \times h_1 \times \gamma_{\text{石}} - \pi/4 \times d^2 \times h_2 \times \gamma_{\text{sat}}^{\pm} - f \quad (1)$$

当桩管沉到设计深度时 $h_1 = h_2 = H$,

$$F_1 - F_2 - f = \pi/4 \times d^2 \times H \times (\gamma_{\text{石}} - \gamma_{\text{sat}}^{\pm}) - f = \pi/4 \times d^2 \times H \times (1550 - 1900) - f < 0, F_1 < F_2 \quad (2)$$

当 $h_1 = H = 11\text{m}$, $h_2 = 4.5\text{m}$, 假设管内石柱总压力和管壁动摩擦阻力相等时:

$$f = \pi/4 \times d^2 \times h_1 \times \gamma_{\text{石}} / (\pi \times d \times h_1) = 1/4 \times 0.426 \times 15.5 = 1.65 \text{ (Kpa)} \quad (3)$$

管内饱和碎石时:

$$F_1^{\text{sat}} - F_2 - f' = \pi/4 \times d^2 \times h_1 \times \gamma_{\text{sat}}^{\text{石}} - \pi/4 \times d^2 \times h_2 \times \gamma_{\text{sat}}^{\pm} - P' \times \tan \delta' \quad (4)$$

当桩管沉到设计深度时 $h_1 = h_2 = H$

$$F_1^{\text{sat}} - F_2 - f_{\text{sat}} = \pi/4 \times d^2 \times H \times (\gamma_{\text{sat}}^{\text{石}} - \gamma_{\text{sat}}^{\pm}) - P' \times \tan \delta' \quad (5)$$

饱和碎石在管内仅碎石柱顶可以排水, 整体上属排水不畅状态, 在振动力的作用下, 将产生液化^[10], 碎石对管内壁的有效压力为零, 即 $P' = 0$

$$F_1^{\text{sat}} - F_2 - f_{\text{sat}} = \pi/4 \times d^2 \times H \times (1990 - 1900) > 0. \quad (6)$$

式中, H -钢管总长 (m), 取 13.5m;

h_1 -管内碎石高度 (m)

h_2 -桩管入土深度 (m)

$\gamma_{\text{石}}$ 、 $\gamma_{\text{sat}}^{\text{石}}$ 、 $\gamma_{\text{sat}}^{\pm}$ -分别为碎石干密度、饱和密度和土的饱和密度 (kg/m³)

d 、 D -分别为钢管直径和碎石桩直径 (m)

F_1 、 F_1^{sat} -分别为管内干碎石、饱和碎石柱底压力 (KN)

F_2 -饱和土对碎石柱底的压力 (KN)

f 、 f' -分别为干碎石、饱和碎石与管壁的有效摩阻力 (KN)

P' -为饱和碎石与管壁单位面积平均有效压力 (kPa)

δ' -为饱和碎石与管壁的有效外摩擦角 (°)

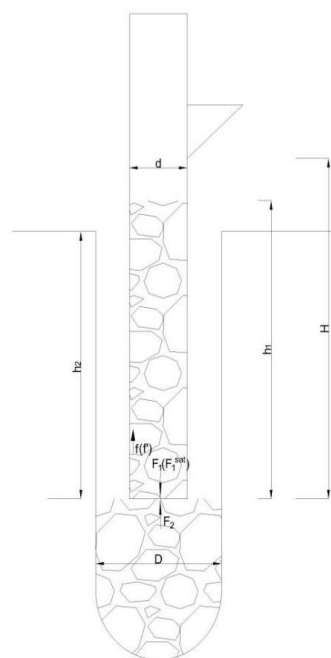


图 1 碎石桩管底受力分析图

3.3 产生问题的原因

3.3.1 碎石下料问题原因

从式 (2) 可以看出在没有考虑碎石与管壁摩阻力情况下, 管底液化土压力仍大于管内碎石柱压力, 所以, 无论采用什么桩尖, 活门均打不开, 碎石料也无法出管。

从式 (6) 可以看出, 管底液化土压力小于管内饱和碎石柱压力, 所以, 无论采用什么桩尖, 活门均可打开, 碎石料可以出管。

3.3.2 断桩原因

下部 5m 长桩体形成原因: 为向管内灌水方便, 管出水口最高点为 3.5m, 先在灌水情况下形成下部 3.5m 桩, 再将桩管灌满碎石和水至地面上 3.5m, 再将饱和碎石振动沉至地面形成下部 5m 长左右的桩。

中段 4.8~8.3m 桩身不明显原因: 由于中部管内灌水不方便, 桩底活门已打开, 施工人员认为不需要加水即可继续施工, 同时也不对桩管进行敲击, 以判定碎石位置, 导致管内碎石底压力小于管外液化土压力, 致使活门受挤

压关闭,下部灰色液化土体顺管底上涌至基底停止,导致该段断桩。

根据式(3)计算可得管壁对碎石的侧摩阻力为1.65kpa,远小于按规范^[9]表5.3.5-1干作业碎石侧摩阻力最小值135kpa的85%~90%^[10]计算所得的动摩阻力值。因此,在此种工况下,下料成桩不是石柱整体下沉引起,而是“其沉降变形是在一次次的坍塌过程中完成的”^[11]。

基底以上桩体(上部)形成原因:振动沉管桩属于低振幅次中频振动^[12](700~1200次/min, 11.7~20Hz),涵盖黏性土、粉土、砂土固有频率^[13],振动沉管过程中,桩长上部1/3桩管和土体形成空隙,并形成排水通道^[14],振杆下沉和上拔振孔宽度均扩大^[13],孔隙水通过管外壁和土之间的间隙流出,再加上流动土体经过③粉砂,导致超孔隙水压力至基底时消失殆尽,致使活门重新打开,正常成桩。

4 解决问题的对策及思考

当采用干碎石为成桩材料时,可采用振动沉管气冲法^[15-16]、锤击沉管法解决成桩下料困难问题。但气冲法需专门配置空压机增加施工成本,且噪音较大;锤击法较振动沉管法效率低^[17],不适合大工程量项目。

当采用饱和碎石为成桩材料时,振动沉管成桩过程中应采取的措施使管内碎石始终处于饱和状态。当基础埋深较大时,可先下挖一部分再施工碎石桩,以减少空桩施工费用和时间,不具备条件时,可直接在自然地面开始施工并采用重锤等效设计桩顶至自然地面间的饱和碎石柱重量,以减少碎石浪费在空桩段。

单桩施工完成后应及时回填空桩部分以保证人员安全和地基强度满足设备使用要求。

吸取前期施工经验,对上述成桩方法进行技术分析后,采用振动沉管持续碎石饱和的成桩方法,对剩余碎石桩进行施工,经检验和施工验槽没有发现下料困难和断桩问题。

5 结论

(1)振动沉管碎石桩处理液化地基施工下料困难原因,是因为沉管后地层液化导致管底流动土压力大于管内干石柱压力减去管壁对碎石磨阻力的值所致。

(2)避免下料困难可采取干碎石振动沉管气冲法、锤击法或振动沉管持续饱和碎石等方法解决,采用饱和碎石振动成桩工艺更为经济。

[参考文献]

[1]国家地震局.中国地震烈度区划图(1990)(附说明书)[M].北京:地震出版社,1991.

[2]GB50223-95 抗震设防分类标准[S].

[3]GB50191-93 构筑物抗震设计规范[S].

[4]王东阳.沉管灌注桩的“涌泉”问题及处理[J].西部探矿工程,2003(6):167-168.

[5]吉同元等.软土地基中CFG桩单桩施工引起的超静孔隙水压力[J].公路交通科技,2006,23(8):56.

[6]熊载波等.振动沉管挤密碎石桩在黄河冲积[J].山东电力高等专科学校学报,1999,2(4):82.

[7]周荣官.粉砂地基中振动沉管灌注桩的几个问题[J].水利水运工程学报,2004(1):76.

[8]《桩基工程手册》编写委员会.桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.41.

[9]JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S].

[10]汪闻韶.土的动力强度和液化特性[M].北京:中国电力出版社,1996.34,132.

[11]詹森昌.溜井中矿石压力计算公式分析与讨论[J].铜业工程,2020(4):21.

[12]江建清等.振动沉管灌注桩在新疆克孜河砂土地基中的应用[J].西部探矿工程,2010(3):23.

[13]罗涛.十字翼共振法处理可液化地基室内模型试验研究[D].南京:东南大学,2017.:38,52

[14]吴育萍等.振动沉管灌注桩沉管过程中下沉阻力探讨[J].浙江建筑,2006,23(7):42

[15]基础工程网.振动沉管碎石桩机理及常见问题分析[EB/OL].(2015-08-25).

[16]韦伟.振动沉管碎石桩气冲法施工工艺的设备:03277789.2[P/OL].2004-04-29.

[17]林宗元.岩土工程治理手册[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1993.152.

作者简介:陈正元(1996.2—),男,助理工程师,毕业院校:郑州工商学院,所学专业:地质工程,当前就职单位:河南省地热能开发利用有限公司,职务:员工,职称级别:助理工程师;柴朝生(1976.4—),毕业院校:郑州大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:河南省地质局生态环境地质服务中心,职务:国土整治研究所所长,职称级别:工程师。