

宿迁黄河故道整治建筑物工程 液化地基处理方案优化

周 皞¹, 田晋生², 宋 力³, 刘 建⁴

(1. 江苏省宿迁市水务勘测设计研究有限公司, 江苏 宿迁 223800; 2. 江苏省水利工程技术咨询有限公司, 江苏 南京 210000;
3. 江苏省水利科学研究院材料结构所, 江苏 扬州 225002; 4. 江苏省水利机械制造有限公司, 江苏 扬州 225001)

摘要:对照江苏省水工建筑地基液化处理现有技术,优化宿迁市黄河故道整治建筑物工程液化地基处理方案,提出对建筑物基础下液化土层一定深度采用水泥搅拌桩防渗墙围封、建筑物基础下以及轮廓外一定范围并施打水泥搅拌桩对土体加固,并将挡水建筑物的公路桥、工作桥与闸墩采用嵌固的支撑方式,增加整体刚度处理方案。通过陈圩闸、蔡支闸实施效果分析,结果表明:优化方案更适合黄河故道整治建筑物工程现场实际情况,能满足建筑物地基抗震防液化要求,为类似水工建筑物液化地基处理提供借鉴。

关键词:黄河故道; 水工建筑物; 地基液化; 优化

中图分类号:TV553

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)02-0053-0005

Optimization of liquefied foundation treatment plan for renovation of the Yellow River old riverway in Suqian

ZHOU Hao¹, TIAN Jinsheng², SONG Li³, LIU Jian⁴

(1. Jiangsu Suqian Water Affairs Survey, Design and Research Co., Ltd., Suqian 223800, China;
2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
3. Material Structure Laboratory, Jiangsu Hydraulic Research Institute, Yangzhou 225002, China;
4. Jiangsu Water Conservancy Machinery Manufacturing Co., Ltd., Yangzhou 225001, China)

Abstract: According to the existing technology of liquefaction treatment of hydraulic building foundation in Jiangsu Province, optimize the liquefaction foundation treatment plan of the he Yellow River old riverway renovation project in Suqian City, and propose to use cement mixing piles to enclose the liquefied soil layer under the building foundation with an anti-seepage wall, and the building cement mixing piles are applied under the foundation and within a certain range outside the outline to reinforce the soil, and the road bridge, working bridge and gate pier of the water retaining structure are supported by embedding to increase the overall stiffness. Through the analysis of the implementation effect of Chenwei Gate and Caizhi Gate, the results show that the optimized scheme is more suitable for the actual situation of the site of the Yellow River old riverway regulation building project, meet the requirements of measures for earthquake resistance and liquefaction prevention of building foundations, and provide reference for the liquefaction foundation treatment of similar hydraulic structures.

Key words: the Yellow River old riverway; hydraulic structures; foundation liquefaction; optimization

收稿日期: 2022-09-11

作者简介: 周皞(1980—),男,高级工程师,长期从事水利工程规划设计工作。E-mail:445281934@qq.com

通信作者: 宋力(1977—),男,正高级工程师,主要从事工程材料结构研究及项目管理工作。E-mail:songli0008@126.com

土是矿物颗粒在长期风化作风下形成的疏松堆积物,由于受生成、搬移及长期经受复杂地质变化及理化作用,土的组成颗粒、紧密度、土层分布及层厚度的变化多样。如何按照规范的相关规定,针对不同水工建筑物的结构特点及地基条件合理确定液化土层处理方案,在工程实践中采取必要的抗液化措施,减轻或减少土质液化造成的危害程度,是本研究的目的。

1 水工建筑地基液化处理技术简介

江苏省兴建的水工建筑物多为壅水或挡水型建筑物,众多的水工建筑物等级别为Ⅲ等中等3级以下,地基土层液化等级一般为中等或轻微液化,对于此类水工建筑物以及一些基础下含有多层液化土层且比较厚的建筑物工程,要达到全部完全处理液化土层目地,需采用桩基、沉井结构,并将桩基、沉井底部沉入不液化土层一定深度,处理工程量大、费用高,并且有些技术问题还有待进一步研究解决^[1-2],例如桩间、沉井以及周边土体液化对壅水建筑物侧向位移及抗滑稳定的影响。当前建筑、交通工程领域常见的液化地基处理方法一般为强夯和砂、砾石散体材料挤密桩法,处理原理是物通过强夯、砂石桩振冲挤密,提高非黏性土的密实度并形成一定的渗水通道,以利于孔隙水压力的消散。水工建筑物由于基础有防渗的特殊要求,所以一般不宜采用砂、砾石散体材料桩法,同时由于水工建筑物上下游水位差较高,势必造成建筑物基底可液化土层在动荷载作用下近似于不排水状态。江苏省水利工程常用做法是,结合建筑物的防渗布置,采用地连墙或水泥搅拌桩防渗墙对液化土层围封的处理方式,考虑到建筑物上游护坦位置是土层液化的薄弱部位,如在增加在建筑物上下游基础外一定范围间隔施打水泥搅拌桩,阻隔或减轻因区域外土壤孔隙水压力增大,进而保护桩周及基础围封内不发生或减轻液化和降低承载力重分布的影响^[3]。据有关资料介绍,日本神户港1995年遭受强地震,地震震中区域大部建筑物被损坏,唯有当时正处于施工中一座建筑物基本完好,分析其主要原因,是由于在建筑物基础下混凝土基桩周围,采用了格栅状水泥搅拌桩用于基坑支护、围封处理液化土层,提高了混凝土桩的侧向阻力,水泥搅拌桩围封区域内土层未有产生液化的痕迹。

2 工程概况

宿迁黄河故道整治工程中泓控制建筑物共计6座建筑物,其中宿城区段:皂河地涵、蔡支闸位于地震基本烈度Ⅷ度区,陈圩闸位于地震基本烈度Ⅶ度区;泗阳县段:新袁闸、大兴闸、李口闸位于地震基本烈度Ⅶ度区。可研阶段设计报告中推荐建筑物地基液化处理方案:皂河地涵(底板底面位于④层土)、陈圩闸(底板底面位于④-1层淤泥质黏土层上,其下为⑥层土)、大兴闸(底板地面位于⑥层土)采用施打水泥搅拌桩对液化土层进行围封的措施;蔡支闸、李口闸(底板底面位于③层土)、新袁闸(底板底面位于③、⑦层土)采用砂石桩挤密法处理液化地基。

工程沿线典型建筑物陈圩闸、蔡支闸处地质剖面见图1。陈圩闸底板底面置于④-1层淤泥质黏土层上,依次由上至下分布为:粉质夹砂层、淤泥黏土层、粉土夹黏土层及粉砂夹粉质层,分别对应⑥层、⑦-1层、⑦层及⑧层分层,其中⑥层及⑧层为液化层。蔡支闸底板底面置于③层轻粉质砂壤土层,其下卧粉砂夹粉土层(⑥层)、粉砂加粉质黏土层(⑧层)均为易液化土层。两闸地基不同之处为,陈圩闸地基⑥层与⑧层两液化土层之间内夹不液化土层,蔡支闸地基⑥层、⑧层液化土层底面紧邻,为深厚液化地基。

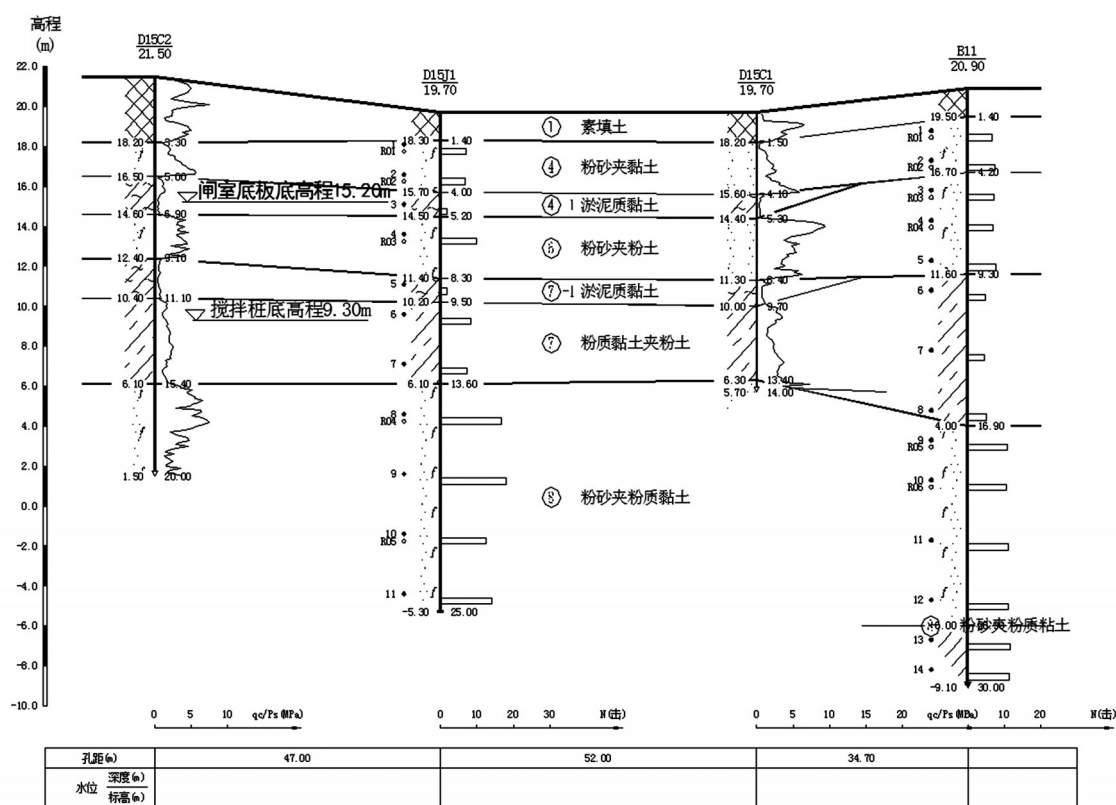
3 部分处理液化基础方案及结构措施优化

3.1 部分处理液化基础总体方案优化

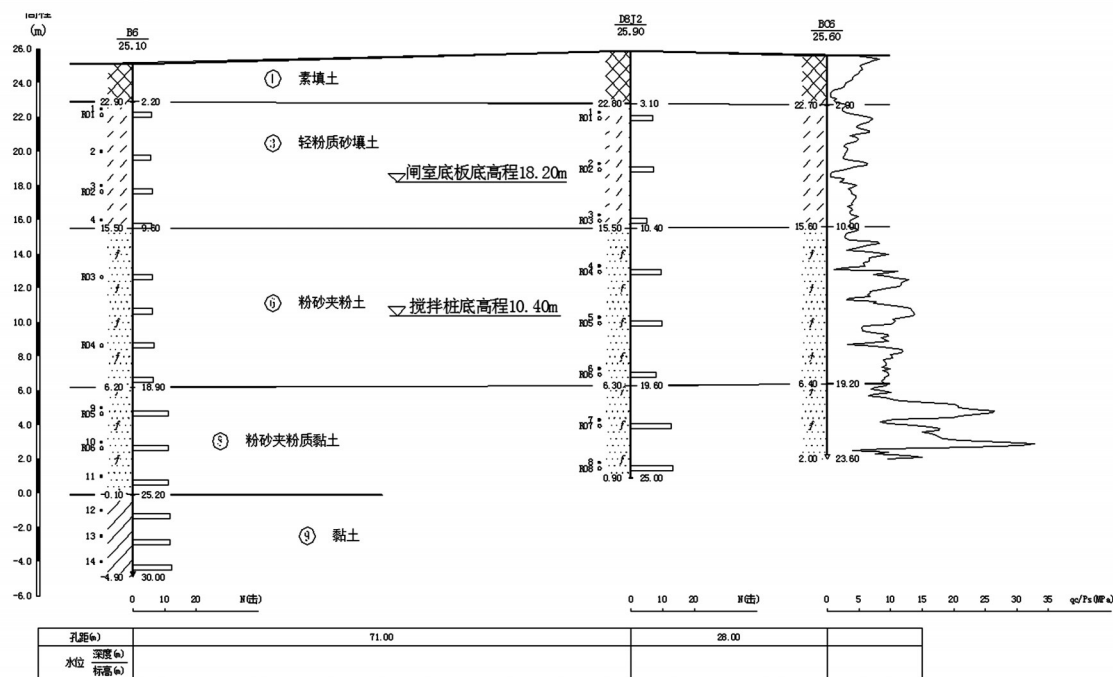
宿迁黄河故道整治工程建筑物工程等级为Ⅲ等,建筑物级别为3~4级,根据《水工建筑物抗震设计标准(GB51247—2018)》及《水工建筑物抗震设计规范(SL203—1997)》确定本工程抗震设防标准等级为丙类。

对于水工建筑物的抗液化措施,《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)给出建议措施见表1,规范中对于甲类建筑的地基基础抗液化措施并未专门列举推荐措施,但说明其相应措施要求不能低于乙类建筑要求^[4-6]。

鉴于黄河故道建筑物地基液化等级一般为轻微、中等液化等级,采用了对上部结构及基础部份综合处理措施。江苏省工程等级Ⅲ等、建筑物级别为3~4级水工建筑物鳞次栉比,部分建筑物地基液化需处理,建议考虑部分处理消除地基液化的技术



(a)陈圩闸工程地质



(b)蔡支闸工程地质

图1 建筑物工程地质剖面

措施,对于1、2级壅水建筑物的地基抗液化措施应进行专门研究。

根据《水工建筑物抗震设计规范(SL203—1997)》及《水工建筑物抗震设计标准(GB51247—

2018)》规定:地震的液化土层,根据工程的类别和具体情况,可以选用地下混凝土连续墙或套打多头深层水泥搅拌桩方案围封液化特性地基。采用多头深层水泥搅拌桩方案的目的,一是为了阻断建筑

表1 建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)抗液化建议措施

设防类别	地基液化等级		
	轻微	中等	严重
乙类	部分消除液化沉陷,或对基础和上部结构处理	全部消除液化沉陷,或部分消除液化沉陷且对基础和上部结构处理	全部消除液化沉陷
丙类	基础和上部结构处理,亦可不采取措施	基础和上部结构处理,或更高要求的措施	全部消除液化沉陷,或部分消除液化沉陷,且对基础和上部结构处理
丁类	可不采取措施	可不采取措施	基础和上部结构处理,或其他经济的措施

物基础下土层与周边土层相互作用,二是由于判别砂土地基液化土层,贯入击数一般较低,需要采用搅拌桩进行加固地基。

采用围封方案处理液化地基的机理^[7]为:阻断建筑物基础下土层与周边土层相互作用,通过搅拌桩注入水泥浆充分搅拌后,对桩间土起到挤压增加密实度的效果,在上部荷载作用下,由桩体承载大部份荷载,而桩体之间的土应力相对减小,桩体同时起到对桩间土限制侧向位移及侧向变形;水泥搅拌桩为半刚性体,较桩群间土体,其竖向及侧向承载力均大于普通土体,通过水泥和周围土体中水分发生水化反应,减少周围土体的饱和度,降低液化趋势,同时由于水泥固化剂的掺入,一定程度上增加了土壤黏粒含量(可根据水泥颗粒分析计算,一般资料介绍约增加黏粒含量约为3%),改善了桩周土的工程特性(特别是砂土和粉土)^[8]。

基于宿迁黄河故道整治工程建筑物等级以及地基实际情况,黄河故道中泓控制建筑物底板下普遍为2~3层液化质土层,等级轻微至中等的特点,工程实施综合采用:第一类防止地基液化的方法(地基加固、围封的方法)及第二类即使发生液化也不使其对结构物的使用产生影响(改善结构受力的方法)的处理方法即部分处理液化地基的优化措施:

(1)水泥搅拌桩围封第③层、④层、⑥层可液化土层;

(2)闸基水泥搅拌桩处理,结合地基处理在建筑物底板下围封桩内施打水泥搅拌承载桩,减轻及削弱液化沉陷及液化影响。

3.2 液化地基水泥搅拌桩处理深度的确定

水工建筑物水闸、泵站主体结构实质上是构筑物在土基两侧边墙后有回填土区域的半埋入结构^[9],上下游连接段的挡墙(翼墙)结构为墙后填土、墙前邻水的挡土建筑物,根据地基液化土层的埋置深度,可以根据以下几种情况确定地基液化处理深

度或桩长。

(1)根据上部水工建筑物安全性等级要求完全消除地基因液化引起的沉陷性影响,此种情况设计桩长须完全穿过液化土层,设计桩底到达该液化土层的底端。

(2)上部水工建筑物安全性要求部份消除地基因液化引起的沉陷性影响,设计桩长应同时符合如下要求:①当计算桩长达到15 m时,液化指数 $I_{\text{L}} \leq 4$,当判别深度为20 m时,液化指数 $I_{\text{L}} \leq 5$;对于条形基础及独立基础结构,不应小于基础底面下液化土特征深度和基础宽度的较大值;②位于处理深度范围内,应保证标准贯入锤击数实测值 $N \geq$ 液化判别临界值 N_{cr} 。

本次施工阶段采用按部分消除地基液化沉陷变形的方案,考虑建筑物基底有效覆盖压力的影响,参照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010),适当加厚地基上部非液化质土厚的覆盖厚度,水泥搅拌桩围封、加固桩长按下列公式计算:

$$d_u = d_o + d_b - 2 \quad (1)$$

$$d_u = d_o + d_b - 3 \quad (2)$$

$$d_u + d_w > 1.5d_o + 2d_b - 4.5 \quad (3)$$

式中: d_u 为扣除淤泥质土层厚度后的上层非液化土层厚度; d_w 为地下水位深度; d_b 为基础结构埋深,基础埋深 ≤ 2.0 m时,取2 m; d_o 为液化土特征深度。

建筑物底板下围封周边水泥搅拌桩桩底高程,通过计算确定满足上述要求的围封桩长。采用水泥搅拌桩单桩套打围封处理液化土层,由于水泥搅拌桩桩身存在搅拌均匀性离差大的缺陷,围封搅拌桩的长度宜控制在10 m左右。

(3)目前江苏省内工程界也有一种意见,认为液化土层处理围封深度下限值,对于建筑物基础下存在深厚液化土层,均采用土层标准贯入临界值判别深度15 m作为围封下限,对于深基础采用20 m下限。

3.3 结构辅助措施

(1)结合建筑物防渗处理,建筑物主体以及上、下游联接段翼墙底板下地基液化深度一定范围内,采用套打水泥搅拌桩防渗墙围封底板四周的部分消除液化沉陷措施,结合主体建筑物基础承载力处理,在水泥搅拌桩围封范围内建筑物底板下布置水泥搅拌承载桩的技术措施。

(2)在挡水建筑物底板上、下游护坦部位以及翼墙迎水侧底板前沿散打一定数量的水泥搅拌桩加固地基,通过部分置换,减轻骨架破坏时围封范围内地基土壤颗粒产生的悬浮影响。

(3)增加、改善挡水建筑物上部结构刚度,采用框架式闸室结构,将水闸闸上公路桥、工作边桥以及工作桥与闸墩全部固结,增加了建筑物侧向总体刚度。

4 实施效果分析

黄河故道宿迁段水利基础设施建设整治工程中建筑物的工程级别相对较低,各建筑物基础土体液化判为中等,综合考虑土质条件,工程实施阶段采用了对地基基础及上部结构处理措施,消除不良地质条件液化沉陷负面影响。

陈圩闸底板底面高程▽15.20 m,基坑地质由下至下分别为淤泥质黏土、粉砂夹粉土、淤泥质黏土及粉质黏土夹粉土,对应④-1、⑥、⑦-1及⑦层土体。其中粉砂夹粉土为液化土层,水泥搅拌桩连续墙穿越⑦-1淤泥质黏土层,桩底进入⑦层土0.7~1.0 m,桩长约为6.0 m,⑦层层底高程▽6.30 m,其下为液化土层粉砂加粉质黏土,未采取围封措施。

蔡支闸底板底面高程▽18.20 m,位于轻粉质砂壤土层(③层),基坑土质分别为粉砂夹粉土(⑥层)及粉质黏土夹粉砂(⑧层),全部为液化土,面层面相邻,⑧层土其下为⑨层黏土层,⑨层黏土层层面高程▽0.00 m(部分钻孔未揭示),蔡支闸地基为深厚液化地基。考虑彻底处理所需桩长、投资增加均较大,陈圩闸、蔡支闸上、下游联结段翼墙部考虑到墙后上覆非液化土层较厚,因按照规范规定可部分消除液化沉陷的原则,围封桩长采用了8~9 m,计入建筑物基底有效覆盖压力作用,围封桩长不再增加,同时在翼墙前齿底板下也设水泥搅拌桩连续墙,并与闸室底板周边围封连续墙衔接。

陈圩闸、蔡支闸分别于2021年1月14日开始施工,2022年1月20日通过完工验收,实施效果表明:本优化方案更适合黄河故道整治建筑物工程现场实际情况,解决了原有方案的局限,能更好满足建

筑物地基抗震防液化要求,为整个工程施工的顺利实施提供了可靠保障。

5 建 议

水利工程地基液化处理问题,无论是理论研究还是实际工程应用,抗液化效果的现场试验及检验手段并不成熟,建议如下:

(1)工程施工阶段,基坑降排水会对地基产生固结压实影响,同时水泥搅拌桩的实施会对地基土壤起到一定的挤密和改良作用,需要通过对水泥搅拌桩桩间土体静力触探试验(CPT)和十字板剪切试验,探明土体在加固前、后物理力学性能变化,并检验加固处理后土层液化指数的变化,从而对液化地基处理后土层的改变情况进行评估、总结

(2)水工建筑物上、下游护坦部位由于上覆建筑物有效压力以及覆盖土层厚度均较小,是水工建筑物土层的抗液化处理的薄弱部位,应加强该部位研究处理方案。

(3)水泥搅拌桩施工时建议采用湿喷、干喷法(对环境有一定的扬尘)进行方案比较,以鉴定2种工法对加固效果的影响。

(4)建议淘汰或改进老的水泥搅拌桩施工设备,选用水泥搅拌桩新型改进后的施工设备,以提高水泥搅拌桩体的无侧限强度、渗透系数以及桩体强度的均匀性。

参考文献:

- [1] 何汗宇,王瑞杰,张新东,等.复杂液化地基处理的工程应用[J].工程建设和设计,2018(10):72-74.
- [2] 牛国纯.高压旋喷桩在泵站地基液化处理中的应用[J].海河水利,2019(4):54-56.
- [3] 张中建.水闸地震液化地基处理设计与分析[J].内蒙古水利,2019(1):34-35.
- [4] 水工建筑物抗震设计标准(GB51247—2018)[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [5] 水工建筑物抗震设计规范(SL203—1997)[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [6] 建筑抗震设计规范(GB50011—2010)[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [7] 宋克英,张凯,张启.注浆加固处理液化地基试验研究[J].岩土工程技术,2021(6):205-211.
- [8] 王方圆,刘敏,王新.水工建筑物地基土地震液化处理措施[J].山东水利,2021(4):43-44,47.
- [9] 陈晓东.水库加高扩建工程地基液化处理设计[J].水电站设计,2018(6):9-14.