

围封法在水池结构液化地基处理中的应用

马伟, 周知

(扬州洁源环境股份有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 规范规定未经针对性处理的液化土层, 不得直接作为天然地基的持力层, 因此对有液化土层场地的建(构)筑物必须采取措施。首先分析了传统消除地基液化措施的优缺点, 然后提出了采用水泥土搅拌桩连续墙围封法进行液化地基处理的措施, 并介绍了一些学者关于此方法的研究成果以及在工程中的应用实践。结合某污水处理厂扩建工程, 针对场地内存在的可液化土层, 详细阐述了围封法的设计原则、施工工艺及质量检验方法, 并通过工程实例说明该方法在抑制液化土层侧向变形、提高地基承载力方面的有效性。

关键词: 液化地基; 围封法; 水泥土搅拌桩; 地基处理; 水池结构; 抗震设计

中图分类号: TU478

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0291-05

Application of Enclosure Method in Liquefaction Foundation Treatment of Water Tank Structures

MA Wei, ZHOU Zhi

(Yangzhou Jieyuan Environment Co., Ltd., 225000, China)

Abstract: According to relevant codes, liquefied soil layers not specially treated cannot be directly used as the natural foundation bearing stratum. Therefore, the measures must be taken for building structures in sites with liquefied soil layers. Firstly the advantages and disadvantages of traditional measures for eliminating foundation liquefaction are analyzed, and then the use of the cement-soil mixing pile continuous wall enclosure method is proposed for liquefaction foundation treatment. The research findings from some scholars on this method and the application practices in engineering are introduced. In combination with an expansion project of a wastewater treatment plant, and in response to the liquefied soil layers existing in site, the design principles, construction techniques and quality inspection methods of the enclosure method are expounded in detail. Engineering cases demonstrate the effectiveness of this method in restraining lateral deformation of liquefied soil layers and improving the bearing capacity of the foundation.

Keywords: liquefied foundation; enclosure method; cement-soil mixing pile; foundation treatment; water tank structure; seismic design

0 引言

饱和粉土或砂土在地震时液化是岩土工程领域的重大灾害之一, 可导致建筑物基础不均匀沉降、地面开裂、河堤裂缝和滑移等危害^[1]。根据《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)^[2]中的相关规定, 未进行专门处理的地基不得直接用作天然持力层; 设计时应依据建(构)筑物抗震设防类别及地基液化等级, 选取适宜的抗液化处置方案。

目前常用的消除地基液化措施主要有^[16]:

- (1) 采用桩基或深基础穿越液化土层;
- (2) 采用振冲、振动加密、挤密碎石桩、强夯等地

基处理措施加密地基土法;

- (3) 采用非液化土换填替换液化土。

其中加密地基土法因其处理效果好、造价相对较低等优点而被普遍采用, 但施工过程会对周围建筑物和环境造成较大影响, 不适用于周边建(构)筑物及管线密集区域^[3]。在天然地基承载力能够满足设计要求且基础没有抗浮需求的前提下, 采用桩基或深基础造价高, 经济性较差, 且桩基础并不能防止由于地基液化引起地基侧向大变形造成的损害。国内外的多个地震震害调查均发现有因地基液化诱发的地面侧向水平位移造成桩基的破坏, 从而引起上部结构的破坏。王青桥等^[4]通过对数场地震中桥梁桩基破坏案例的系统梳理指出, 液化场地因液化和变形导致的地表侧向扩展是诱发桩基损伤失效的主导因素。张建民^[5]基于多次震害调查分析进一步

收稿日期: 2026-12-25

作者简介: 马伟(1970—), 男, 大专, 副高级工程师, 从事建设工程管理工作。

揭示,地震液化会引发水平地基发生明显的侧向位移,液化地基中桩体的水平变形幅度与方向主要受控于液化土层的侧向位移场。因此,在进行可液化场地桩基设计时,除需考虑上部结构的地震响应外,尚应充分纳入地基侧向变形的影响。换土法仅适用于液化土层埋深较浅且厚度薄的情况,通常换填深度不宜超过3 m,超过此范围则因土方量巨大导致经济性骤降^[6],且基坑边坡失稳风险增大。

《水工建筑物抗震设计标准》(GB51247—2018)^[7]中针对地基中的液化土层明确提出可采用围封法处理。该方法是采用混凝土或钢筋混凝土地下连续墙、高压旋喷连续墙、水泥土搅拌桩连续墙、沉井等措施将地基侧向封闭,从而阻止基础范围内外孔隙水压力的传递,抑制液化土层的塑性流动与侧向变形,实现地基承载力提升。围封结构的完整性是阻断孔压传递的关键,墙体接缝处的防渗处理需满足渗透系数 $k \leq 10^{-7}$ cm/s的要求^[8],其抗液化机理可归纳为三点:分担地震剪应力、阻断高孔压迁移、约束土体流动。“5·12”汶川大地震中,大渡河上的映秀湾等水电站厂房及各种设施遭受严重毁坏,但地基经过围封处理的闸坝未发生明显震害,通过对该区域围封闸坝的现场监测显示,震后地基沉降量仅为0.8 cm,远低于未处理区域的12.3 cm;类似地,1995年阪神大地震和2011年东日本大地震中,采用水泥土格栅墙处理的场地也表现出优异的抗液化性能,均证实了围封法的有效性与适用性。

围封法中采用的水泥土搅拌桩连续墙应用广泛,施工工艺成熟且成本低廉。工程实践表明,干法水泥搅拌桩可节约工程造价约30%,超重力离心模型试验显示,即使经历0.4g强振历史,水泥土格栅墙围封的土体超静孔压仍显著低于未处理场地,且外侧格室对中心格室存在“遮蔽效应”,这种“遮蔽效应”可使中心区域孔压峰值降低,进一步提升抗液化效果^[9]。通过经济性对比显示,在同等设防等级下,该方法造价仅为桩基方案的42%,工期缩短35%,因此在天然地基承载力能够基本要求时,该方法属于兼具经济性与可行性的优选途径。阎凤翔等^[10]对地基土液化的作用机理,以及围封法抑制地基土液化的核心原理展开系统阐述,并明确指出,格栅式水泥土搅拌桩可通过顶部与地下室底板相连接,形成稳定土层密闭空间,围封液化土,限制土体透水和剪应变,同时改善地基动力性质;梁爱萍等^[11]以某泵站工程为背景,提出运用双排水泥搅拌桩套打工艺,

使桩体形成连续壁状墙体,实现对泵站底板下液化土层的围封加固,经实践验证该围封方式加固效果良好,为泵站等水利相关构筑物的液化地基处理提供了实例参考;赵铁^[12]分析了水泥土搅拌桩处理液化土的原理,并通过试验得出水泥土桩不仅可以提高土体的抗液化能力,还可以起到加固土体、减少地基沉降的作用,加固土体可以限制超静孔隙水压力上升,从而较为明显的减轻土体的液化趋势。蔡飞^[13]研发了一套地基加固体系,将大间距格栅状水泥土搅拌桩墙与竖向塑料排水管相结合,并基于离心模型试验与动有效应力有限元法,系统评价了其抗液化性能。结果表明:格栅结构可有效抑制液化层的侧向流动;排水系统则能避免振动过程中格栅区内超静孔压的显著上升,从而保障液化层的地基承载力,同时阻断液化层自格栅外侧向建筑物底部区域的渗流补给。

本文通过一个大型水池结构采用围封法进行液化地基处理的工程案例详细介绍围封法的设计与施工技术要点。

1 工程概况

本项目为现有污水处理厂扩建工程,核心水处理构筑物涵盖以下类别:细格栅及沉砂池、粗格栅、进水泵房、生物池、沉淀池、提升泵房、滤池、消毒池等。经前述工艺系统处理后的出水水质指标,需严格符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中规定的一级A排放标准要求。

2 工程地质情况

工程场地地貌单元为长江北岸冲积平原地貌,场地标高为4.24~7.00 m。根据勘察资料,结合场地地层的沉积特点和物理力学特性,场地勘察深度范围内土层自上而下共分9个主层和5个亚层,典型地质剖面图如图1所示。

各土层对应的承载力特征值参数详如本文表1所示内容。

根据勘察报告提示,本工程场地的抗震设防烈度取值为7度(0.15g),场地类别核定为Ⅳ类,设计地震分组划分为第一组。场地临近大运河及长江,地下水位较高,建(构)筑物的抗浮水位取室外设计地坪标高。本场地地面以下20 m范围内②层粉砂夹粉土、③₁层粉土夹粉砂、④₁层粉土为可液化土层,场地的液化等级为中等。本工程主要水处理构筑物抗

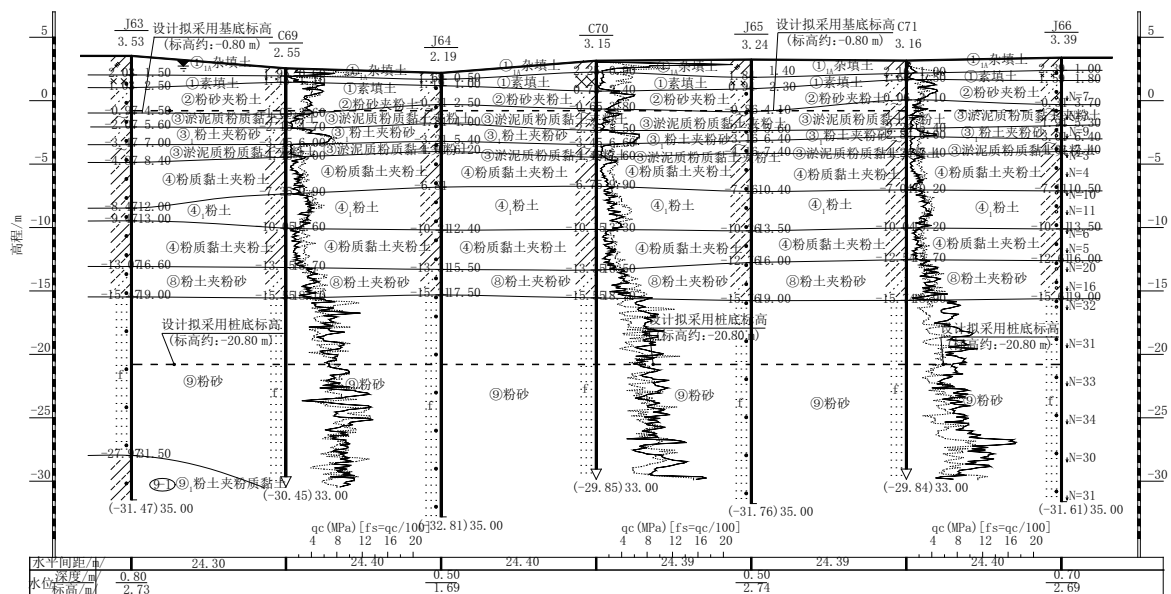


图1 典型地质剖面图(单位:m)

表1 各土层地基承载力表

层号	土层名称	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa	是否液化 土层
① _A	杂填土	—	—
①	素填土	—	—
②	粉砂夹粉土	120	可液化
③	淤泥质粉质黏土夹粉土	70	不液化
③ ₋₁	粉土夹粉砂	120	可液化
④	粉质黏土夹粉土	95	不液化
④ ₋₁	粉土	110	可液化
⑤	粉砂夹粉土	160	不液化
⑤ ₋₁	粉土夹粉质黏土	120	不液化
⑥	粉质黏土夹粉土	120	不液化
⑦	粉砂夹粉土	150	不液化
⑧	粉土夹粉砂	130	不液化
⑨	粉砂	200	不液化
⑨ ₋₁	粉土夹粉质黏土	130	—

震设防类别为乙类,根据抗震规范^[2],必须采取措施全部消除液化沉陷。

3 围封法消除地基液化沉陷设计方案

本工程针对各个构筑物荷载大小、基底土层性质、结构形式和埋深采用不同的消除地基液化沉陷围封处理方案。围封平面布置结合上部构筑物底板轮廓布置,围封隔离桩成墙应保证墙体可靠、内部土体封闭,桩体与构筑物底板采用柔性连接。

对于埋深较浅构筑物,地基附加应力较大,构筑物整体抗浮能够满足要求,但是地基承载力和沉降验算无法需满足规范要求,对于此类构筑物,地基加固处理可采用水泥土搅拌桩复合地基提高地基土的强度,增大地基土的变形模量。水泥土搅拌桩的成

桩工艺对桩间土并没有挤密作用,并不能消除桩间土的液化,但桩体本身是不会液化的,置换率越高,土层中非液化部分所占的比重越大,会降低液化土对建筑物的危害^[15]。在复合地基外围及底板中部布置围封处理液化土层,围封隔离桩可设置在池壁或柱底位置以承载上部荷载,在解决土层液化问题的同时,还能实现地基承载力的提升。如细格栅及曝气沉砂池平面尺寸约为63.00 m×22.05 m,高5.85 m,埋深2.0 m,底板持力层为①层素填土,单体范围内液化土层包含②、③₋₁、④₋₁层,④₋₁层埋深为底板下约13.0 m。围封平面尺寸63.0 m×22.05 m,桩顶标高至构筑物底板垫层,桩底进入相对密实的非液化土层1 m,桩长约14 m,形成密闭空间,保证围封处理效果。二沉池构筑物单座平面尺寸约为72.5 m×110.6 m,高6.4 m,埋深3.6 m,底板持力层为①层素填土,单体范围内液化土层包含②、③₋₁、④₋₁层,④₋₁层埋深为底板下约16.0 m。围封平面尺寸72.5 m×110.6 m,考虑平面尺寸较大,横向设置1道围封隔离桩,纵向设置2道围封隔离桩,围封隔离桩最小间距约36.9 m,桩长约17 m。

对于埋深较深构筑物,地基附加应力较大,整体抗浮不满足要求,地基承载力和沉降验算也无法需满足规范要求,采用采用预制方桩抗拔及承压。在预制方桩外围及底板中部布置围封处理液化土层,围封隔离桩设置在池壁位置以承载上部荷载,对应的围封地基在解决土层液化问题的同时,还能实现地基承载力的提升。如图3所示,生物反应池构筑物平面尺寸约为148.0 m×148.1 m,高10.9 m,埋深

4.8 m,底板持力层为③层淤泥质粉质黏土夹粉土,单体范围内液化土层包含②、③₋₁、④₋₁层,④₋₁层埋深为底板下11~16 m。围封平面尺寸148.0 m×148.1 m,考虑平面尺寸较大,横向设置2道围封隔离桩,纵向设置2道围封隔离桩,围封隔离桩最小间距约49.3 m。如图4所示,桩顶标高至构筑物底板垫层,桩底进入相对密实得非液化土层1 m,桩长为12~17 m,形成密闭空间,保证围封效果。中间提升泵房及高效沉淀构筑物平面尺寸约为104.0 m×67.8 m,高10.9 m,埋深3.6 m,底板持力层为①层素填土,单体范围内液化土层包含④₋₁层,④₋₁层埋深为底板下约7 m。围封平面尺寸104.0 m×67.8 m,考虑平面尺寸较大,横向设置1道围封隔离桩,围封隔离桩最小间距约52.0 m,桩长约8 m。加氯接触池及出水泵房构筑物平面尺寸约为144.3 m×25.3 m,高7.0 m,埋深5.8 m,底板持力层为③层淤泥质粉质黏土夹粉土,单体范围内液化土层包含②层,②层埋深为底板下约6.0 m。围封平面尺寸144.3 m×25.3 m,考虑平面尺寸较大,横向设置2道围封隔离桩,围封隔离桩最小间距约48.1 m,桩长约7 m。

根据围封法处理液化地基的工作机理,围封隔离桩应具有足够的抗渗性、适宜的强度、变形能力、较强的耐久性,在水的长期作用下不发生破坏,墙体之间可靠连接。根据当地工程经验,围封隔离桩采用单排双轴搅拌桩,桩径为700 mm,桩间距为500 mm,水泥采用强度等级不低于P·O42.5级的普通硅酸盐水泥,水泥掺入比例按质量计需不低于13%,配置浆液所采用的水灰比区间控制在0.5~0.6,28 d龄期的无侧限抗压强度 ≥ 0.8 MPa,加固体的渗透系数 ≤ 7 cm/s,空搅段水泥掺入量8%,成桩采用二喷四搅的搅拌工艺。

4 围封施工工艺

本工程围封采用格栅布置的双轴水泥土搅拌桩墙,施工工艺简单易行,施工作业面小,无振动,噪声小,且不会产生附加沉降,在施工期间对周围的环境影响很小。施工应符合《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[14]中的相关规定。

主要施工步骤如下:

(1)将搅拌施工机械精准就位,完成机身调平与桩位对中操作;

(2)启动预搅工序,将搅拌头下沉至设计规定的加固深度;

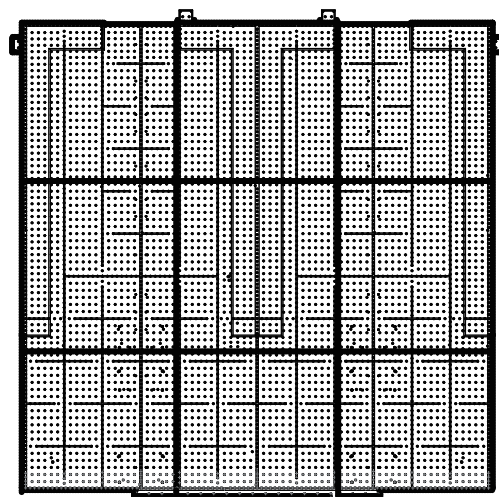


图3 生物反应池搅拌桩围封布置平面图



图4 搅拌桩围封剖面图(单位:mm)

(3)实施边喷浆、边搅拌、边提升的联动作业,直至达到预设停浆面,提升速率控制在0.6~0.8 m/min;

(4)再次启动搅拌系统,将搅拌头下沉至设计加固深度,下沉速率控制在0.8~1.0 m/min;

(5)重复喷浆与提升工序,直至抵达预定停浆面;

(6)操控搅拌头在桩身范围内上下往返复搅一次;

(7)关停搅拌机械,完成设备清洗与机位转移,依照上述流程开展下一根桩的施工。

5 施工质量检验

水泥土搅拌桩围封在成桩3 d后,采用轻型动力触探法检测上部桩身的均匀性;成桩7 d后,通过浅部开挖桩头的方式开展检验工作,开挖深度应超过停浆(灰)面以下0.5 m,以此核查桩体搅拌的均匀性,并完成成桩直径的量测工作;成桩28 d后进行,需采用钻心取样法检测搅拌桩桩身强度,无侧限抗压强度应 ≥ 0.8 MPa。水泥土搅拌桩墙围封兼做复合地基的承载力核验工作,需同步采用复合地基静载荷试验与单桩静载荷试验两种方法开展,此外还应应对围封的渗透系数进行检测,确保围封渗透系数 $\leq 10^{-7}$ cm/s。

6 结 语

采用水泥搅拌桩墙围封法对基础底板下的液化土层进行围封加固,从而阻止基础范围内外孔隙水压力的传递,抑制液化土层的塑性流动与侧向变形,防止基底土层液化流动而失去地基承载力,同时也可兼做复合地基竖向增强体增加地基承载力。本文通过某污水处理厂的大型水池结构采用围封法进行液化地基处理的工程案例详细介绍围封法的设计与施工方案,能够为今后同类工程提供有益借鉴。

参考文献:

[1] 陈超.液化地基处理方案及比较[J].四川建材,2020,46(6):78-79.
[2] GB/T50011—2010 建筑抗震设计标准(2024年版)[S].
[3] 龚晓南.地基处理手册[M].第3版.北京:中国建筑工业出版社,2008.
[4] 王青桥,韦晓,王君杰.桥梁桩基震害特点及其破坏机理[J].震灾防御技术,2009,4(2):167-173.

[5] 张建民.水平地基液化后大变形对桩基础的影响[J].建筑结构学报,2001,22(5):75-77.
[6] 王仲良.坝基地震液化土层处理设计[J].科技与创新,2018,(20):122-123.
[7] GB51247—2018 水工建筑物抗震设计标准[S].
[8] DB32/T 4152—2021 水利工程液化地基处理技术规范[S].
[9] 周燕国,曹渊,石川明,等.强震损伤格栅墙处理地基抗液化性能离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊1):11-15.
[10] 阎凤翔,巩天真.格栅式水泥搅拌桩处理液化的工程应用[J].电力学报,2013,28(6):533-540.
[11] 梁爱萍,宋颖超,岳金隆.水泥搅拌桩在处理地基液化土中的应用[J].科技信息,2011,13(1):358-359.
[12] 赵轶.水泥土搅拌桩处理液化土的探讨[J].山西建筑,2016,42(26):98-99.
[13] 蔡飞.大间隔格栅墙加固地基的抗液化效果研究[J].成都:西华大学学报(自然科学版),2020,39(1):1-11.
[14] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S].
[15] 乔江瀚.典型液化土地地基处理方案选择综合分析[J].山西建筑,2019,45(8):71-72.
[16] 于冰.砂土的液化及防范措施[J].岩土工程界,2001(6):29.

(上接第 280 页)

与水生生态修复实践[J].净水技术,2025,44(增刊1):305-310;413.
[5] 刘邦俊,王宁.南河综合整治工程设计浅析[J].城市道桥与防洪,2021(2):89-91.
[6] 施怀荣,甘露,赵维文,等.圩区水环境生态修复案例:苏州市紫薇文化园[J].中国给水排水,2024,40(22):111-118.
[7] 秦一博.辽宁东部中低山区生态清洁小流域治理措施——以新宾满族自治县那家堡子小流域为例[J].水利技术监督,2019(3):79-81.
[8] 苏丹,刘天朝,郭翔.黄河下游沿黄生态清洁小流域建设实践[J].人民黄河,2025,47(增刊1):82-83.
[9] 杨宪杰,白堃,张晓远.广东省生态清洁小流域建设模式研究——以广州市从化区为例[J].人民长江,2025,56(增刊1):32-35.
[10] 朱焱峰.上海市生态清洁小流域系统治理探索与实践[J].上海建设科技,2024(4):52-54;59.
[11] 曾祥华.上海市西虹桥生态清洁小流域建设实践[J].水利技术监督,2025(3):57-59.

[12] 任华春,沈骏,张乐安.美丽乡村型生态清洁小流域建设思路及方法——以上海朱泾镇西部郊野单元建设为例[J].人民长江,2025,56(增刊1):40-43.
[13] 袁志精,杨一艳.河道综合治理清淤与水生态保护和水质提升关系研究[J].中国资源综合利用,2024,42(10):174-176.
[14] 上海市河长制办公室,上海市水务局.上海市生态清洁小流域建设总体方案[R].2020.
[15] 上海市水务局.上海市水土保持规划修编(2021-2035年)[R].2021.
[16] 汪真,蒋彬,张澳.强化型生态浮床净化富营养化水体的效能与机制[J].中国给水排水,2025,41(7):17-23.
[17] 孔赞,宋壮壮,施卫红.组合生态浮床对太湖水质净化效果及其生物配置研究[J].给水排水,2022,58(增刊2):210-219.
[18] 张燕,陶进雄,梁妙,等.中山市典型污染河涌水体整治试验方法和效果分析[J].环境程,2019,37(10):73-77.
[19] 刘丽香,韩永伟,刘辉,等.曝气技术对黑臭水体治理效果影响的研究进展[J].环境科学研究,2020,33(4):932-939.