

水泥土搅拌桩技术在温家桥西闸地基处理中的应用

卢恩武

(商河县水务局, 山东 商河 251600)

【摘要】针对济南市商河县土马河温家桥西闸闸址存在土层可液化、地基承载力不足及渗流问题,研究采用水泥土搅拌桩复合技术处理工程地基,通过地质勘察、参数优化、稳定性计算及工艺控制,结果显示:闸基承载力从 80~120 kPa 提升至 145 kPa 以上,液化指数降至 2 以下,渗流坡降从 1.13 降至 0.32。对比传统方案,该技术能够节省 25% 造价,缩短 30% 工期,并结合黄河故道刁口河工程分析了该技术的推广价值,为黄河冲积平原水闸地基处理提供参考。

【关键词】温家桥西闸;水泥土搅拌桩;可液化土;地基处理技术

【中图分类号】TV543.8

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0024-04

Application of Cement-Soil Mixing Pile Technology in Foundation Treatment of West Sluice in Wen Jiaqiao

LU Enwu

(Water Affairs Bureau of Shanghe County, Shanghe, Shandong 251600, China)

Abstract: The site of west sluice in Wen Jiaqiao on the Tuma River in Shanghe County, Jinan Municipality is faced with liquefiable soil layers, insufficient foundation bearing capacity and seepage issue. This study adopts composite cement-soil mixing pile technology for foundation treatment. Through geological exploration, parameter optimization, stability calculation and construction process control, the results show that the bearing capacity of the sluice foundation rises from 80~120 kPa to over 145 kPa, the liquefaction index drops below 2, and the seepage gradient decreases from 1.13 to 0.32. Compared with conventional schemes, this technology cuts construction cost by 25% and shortens construction period by 30%, and analyzes the popularization value of this technology against the engineering of Diaokou River (the original Yellow River channel), providing technical references for foundation treatment of sluices in the alluvial plain of the Yellow River.

Key words: West sluice in Wen Jiaqiao; Cement-soil mixing pile; Liquefiable soil; Foundation treatment technology

土马河位于山东省济南市商河县,是一条兼具防洪、排涝、灌溉等多重功能的区域性河道。近年来,土马河河道淤积严重、建筑物老化破损、排涝行洪能力不足、雨洪资源利用不充分等问题日益突出。为此,商河县启动了土马河综合治理工程,旨在通过系统治理提升河道综合功能。温家桥西闸作为该综合治理工程中的关键节制闸,承担着重要的水量调控功能。该闸地处黄河冲积平原,地质条件复杂,存在显著的可液化砂壤土层,地基承载力较弱,压缩性较大,水闸的结构安全和使用寿命受到严重威胁。此外,该区域地下水对混凝土结构具有弱腐蚀性,对钢结构具有中等

腐蚀性,进一步增加了工程建设的难度。

常见的地基处理方法中,水泥土搅拌桩因施工简便、成本可控、效果显著等优点,在水利工程地基处理中得到了广泛应用。然而,在黄河冲积平原这种特定地质条件下,水泥土搅拌桩的应用仍需要进一步研究和优化。文章基于温家桥西闸地基处理的实际情况,系统研究水泥土搅拌桩在其中的应用,通过详细的地质勘察数据分析,合理的桩基参数设计,以及科学的施工工艺控制,严格的稳定性计算验证,全面评估水泥土搅拌桩

收稿日期:2025-12-02

作者简介:卢恩武(1972—),男,高级工程师

处理效果。

1 工程概况与地质条件分析

1.1 工程概况

温家桥西闸位于土马河玉皇庙镇段,该闸为1孔3m节制闸,设计流量为 $31.62\text{ m}^3/\text{s}$,主要功能包括调控上游来水、防止洪水倒灌以及维持一定的河道蓄水能力。闸室结构采用C25钢筋混凝土开敞式布置,闸底板高程 10.64 m ,闸顶高程 14.90 m 。工程等级为Ⅳ等,主要建筑物级别为4级,设计使用年限30年。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),场区Ⅱ类场地基本地震动峰值加速度为 0.05 g ,相应的地震基本烈度为Ⅵ度。但依据《山东省建设工程抗震设防条例》,该工程应按不低于地震动峰值加速度 0.10 g 进行抗震设防,对应的地震基本烈度为Ⅶ度。

1.2 工程地质条件

场区属于黄河冲积平原,地势平坦,海拔在 25 m 以下。第四系地层发育完全,总厚度约 220 m 。

1)地层岩性特征。勘察深度范围内揭露的地层依次为:素填土(Q_4^{ml}):黄褐色,稍密,稍湿,层厚 1.90 m ,主要由砂壤土和壤土组成;第①层砂壤土(Q_4^{sl}):褐黄色~灰黄色,稍湿,稍密,层厚 $1.50\sim 1.70\text{ m}$;第②层壤土(Q_4^{sl}):褐黄色,可塑,见铁锰锈斑,层厚 $0.80\sim 3.20\text{ m}$;第③层壤土(Q_4^{sl}):浅灰色~灰黑色,黏性,有机质含量较高,层厚 $0.40\sim 1.20\text{ m}$;第④层砂壤土(Q_4^{sl}):灰黄色,饱和,稍密,层厚 $0.80\sim 1.90\text{ m}$;第⑤层壤土(Q_4^{sl}):灰黄色~浅灰色,可塑,夹薄层砂壤土,层厚 $7.00\sim 8.70\text{ m}$ 。

2)水文地质条件。场区地下水类型主要为第四系孔隙-裂隙潜水,局部具微承压性。地下水埋深较浅,主要赋存于砂壤土和壤土层中。勘察期间地下水位在 $12.99\sim 13.21\text{ m}$ 之间,位于建筑物基底以上。地下水与河水水力联系密切,呈互补关系。水质分析结果表明,场区地下水在干湿交替环境下对混凝土具硫酸盐型弱腐蚀性,对钢筋混凝土结构中的钢筋具弱腐蚀性,对钢结构具中等腐蚀性。这一特性在地基处理设计和材料选择中需要进行特别考虑。

3)地基土工程特性。标准贯入试验结果表明,第②、③、④层砂壤土在地震动峰值加速度

0.10 g 条件下均具有液化可能性,且液化点占比达 100% ,液化等级为严重。同时,地基土承载力特征值较低,仅为 $80\sim 120\text{ kPa}$,无法满足闸室结构的荷载要求。此外,渗透试验显示这些土层具有中等透水性,渗透系数在 $8.30\times 10^{-3}\text{ cm/s}$ 左右,存在较大的渗流风险。这些工程地质问题必须在地基处理中得到有效解决。

2 水泥土搅拌桩技术设计分析

2.1 设计原则与标准

基于温家桥西闸工程的具体条件和要求,水泥土搅拌桩设计遵循安全性、经济性与可行性相结合的原则。安全性方面,需完全消除可液化土层的液化可能性,确保地基承载力满足闸室及挡墙的荷载要求,控制渗流稳定以防止渗透破坏,并充分考虑地震作用下的动力响应特性;经济性方面,通过优化桩长、桩径和桩间距,在保证安全的前提下选择施工简便、设备要求低的方案以控制施工成本,充分利用当地材料减少运输成本;可行性方面,方案需适应现场地质条件和施工环境,兼顾施工设备的技术可行性,同时需确保施工过程对周边环境的影响可控。

2.2 桩基参数设计

为确保设计方案的合理性与经济性,开展了多方案比选工作。方案一:桩径 500 mm 、桩间距 1.0 m 、水泥掺入量 14% ;方案二:桩径 600 mm 、桩间距 1.2 m 、水泥掺入量 12% ;方案三:桩径 700 mm 、桩间距 1.4 m 、水泥掺入量 10% 。比选指标涵盖复合地基承载力、液化处理效果、工程造价及施工可行性。方案一虽承载力满足要求,但桩间距密集,导致施工效率低、造价偏高;方案三桩径较大,对施工设备要求高,且水泥掺入量偏低,桩身强度及液化处理效果稳定性不足;方案二通过合理匹配桩径、桩间距与水泥掺入量,既能满足复合地基承载力 $\geq 145\text{ kPa}$ 、完全消除液化风险的技术要求,又能控制工程造价,且施工工艺成熟、设备易获取,综合优势最为显著。最终确定采用直径 600 mm 的水泥土搅拌桩,桩长根据可液化土层深度确定,为确保完全穿透可液化土层,桩长设计为 $5\sim 6\text{ m}$,使桩端进入稳定的第⑤层壤土中。桩间距根据复合地基承载力要求和液化处理效果确定,采用 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的正方形

布置,面积置换率 0.196,这种布置既能保证处理效果,又具有较好的经济性。根据土质条件和强度要求,水泥掺入量确定为 12%,采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,水灰比控制在 1:0.5~1:0.6 之间。通过室内配比试验,确定桩身 90 d 无侧限抗压强度标准值不低于 1.5 MPa。根据土层性质和现场试验结果,各土层的桩侧阻力特征值见表 1。

表 1 各土层的桩侧阻力特征值

土层编号	土层名称	桩侧阻力特征值/kPa
①	砂壤土	10
②	壤土	12
③	壤土	12
④	砂壤土	14

2.3 复合地基承载力计算

采用《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)中的计算方法进行复合地基承载力计算。

1)单桩承载力计算。单桩竖向承载力特征值 R_a 按下列公式计算,并取较小值:

$$R_a = u_p \sum q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (1)$$

式中: u_p 为桩周长,m; q_{si} 为桩周第 i 层土的侧阻力特征值,kPa; l_i 为桩长范围内第 i 层土的厚度,m; α 为桩端阻力折减系数,取 0.5; q_p 为桩端地基土承载力特征值,kPa; A_p 为桩截面积,m²。

经计算,单桩承载力特征值为 125 kN。

2)复合地基承载力计算。复合地基承载力特征值 f_{spk} 按下式计算:

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta (1-m) f_{sk} \quad (2)$$

式中: m 为面积置换率,取 0.196; β 为桩间土承载力折减系数,取 0.8; f_{sk} 为桩间土承载力特征值,kPa。

计算得复合地基承载力特征值为 145 kPa,满足闸室地基应力要求。

2.4 液化处理效果验证

采用标准贯入试验法对液化处理效果进行验证。处理后的标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 按下式计算:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6 d_s + 1.5) - 0.1 d_w] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (3)$$

式中: N_{cr} 为土层液化判别临界标准贯入锤击数,击; N_0 为基准标准贯入锤击数,击; β 为场地土层调整系数; d_s 为饱和土层标准贯入试验点深

度的取值; d_w 为场地地下水位深度的取值; ρ_c 为土层粘粒含量百分率。

经分层计算得出,各可液化土层临界标贯击数 N_{cr} 取值范围为 6.2~9.5 击。

3 施工工艺与质量控制

3.1 施工工艺流程

水泥土搅拌桩施工采用湿法工艺,施工准备阶段需先清除地表杂物,整平施工场地,再采用全站仪精确定位桩位,确保桩机水平、稳固。搅拌施工阶段,启动搅拌机后,使钻头沿导向架下沉至设计深度,同时按设计配比制备水泥浆,搅拌时间不少于 3 min,到达设计深度后开启灰浆泵,边喷浆边旋转提升。为确保搅拌均匀,需进行二次下沉和提升作业。成桩验收阶段,需在施工完成后对桩头进行修整,开展轻便触探、取芯试验等质量检测,并完善施工记录和检测报告。

3.2 质量控制措施

材料质量控制方面,采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,每批进场水泥均需检验合格证和强度试验报告齐全;掺入的水采用清洁的饮用水,pH 值控制在 6~8 之间;可根据需要添加适量减水剂,改善浆液工作性能。施工过程控制中,采用全站仪监控桩位偏差,确保偏差不超过 50 mm;使用双向经纬仪监测垂直度,使偏差小于 1%;水灰比严格控制在 1:0.5~1:0.6,每班抽查不少于 3 次;提升速度控制在 0.5~0.8 m/min,确保搅拌均匀。成桩 28 d 后进行质量检测,轻便触探试验连续击数应大于 30 击,取芯试验芯样完整性系数大于 0.8 且强度不低于设计值,静载试验抽检数量不少于总桩数的 1%且不少于 3 根。

4 处理效果分析与评价

4.1 地基承载力提升效果

通过静载试验和标准贯入试验对处理效果进行检测,成桩 28 d 后进行 3 组静载试验,采用慢速维持荷载法,结果显示复合地基承载力特征值达 150 kPa,高于设计要求的 145 kPa,荷载-沉降曲线呈缓变型,表明地基具有较好的延性。在处理后的地基上进行标准贯入试验,实测锤击数显著提高,第②层砂壤土的标准贯入击数由处理前的 4~8 击提高到 15~22 击,第③层砂壤土由

7~13 击提高到 18~25 击,消除了液化可能性。

4.2 液化处理效果评价

采用地震反应分析结合液化指数 I_{LE} 计算法对地基液化处理效果进行综合评价。

1) 液化指数计算。依据《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010),场地土层液化指数计算公式如下:

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{crit}}\right) d_i w_i \quad (4)$$

式中: I_{LE} 为场地地基土液化指数; N_i 为第 i 层可液化土层实测标准贯入锤击数, 击; N_{crit} 为第 i 层可液化土层临界标准贯入锤击数, 击; d_i 为第 i 层可液化土层厚度, m; w_i 为第 i 层可液化土层对应的权重函数, m^{-1} 。

经逐层计算,场地地基土经加固处理后液化指数小于 2。对照规范液化等级划分标准,液化指数小于 2 属于轻微液化等级,满足《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)中“可不考虑液化影响”的要求。因此,液化处理效果可靠,满足规范及工程设计要求。

2) 地震反应分析。采用等效线性化方法进行地震反应分析,具体方案如下:基于场区地质勘察资料建立层状地基动力学模型,选用 FLAC3D 软件进行数值模拟,模型计算深度取 20 m(覆盖全部可液化土层及下卧稳定层),边界条件采用粘弹性人工边界以吸收地震波能量。输入地震波采用 EL-Centro 波(1940 年美国埃尔森特罗地震记录),按工程抗震设防要求将峰值加速度调整为 0.10 g,时间步长取 0.01 s,计算时长 20 s。

分析结果表明,处理后的地基在地震作用下的加速度响应沿深度呈衰减趋势,地表最大加速度放大系数为 1.8,小于《水利水电工程抗震设计规范》(SL 203—1997)中规定的 2.0 限值,地基动力响应特性良好,抗震稳定性满足设计要求。

4.3 渗流稳定性分析

采用改进阻力系数法进行渗流稳定性分析,通过建立渗流有限元模型,分析处理前后的渗流场变化,计算结果表明水泥土搅拌桩围封降低了渗流梯度,出口处渗透坡降由处理前的 1.13 降至 0.32,小于允许值 0.40。搅拌桩墙体渗透系数达到 10^{-7} cm/s 量级,表明形成了有效的防渗屏障,桩体与土体形成的复合结构提高了整体抗渗能力。

4.4 经济效益分析

与传统桩基方案相比,水泥土搅拌桩方案具有显著的经济效益。工程造价方面,该方案在材料运输、设备投入和施工周期等环节可节约造价约 25%;工期效益方面,搅拌桩施工工艺简单、施工速度快,比传统桩基方案缩短工期约 30%,对整个项目的进度控制具有重要意义;维护成本方面,经处理后的地基具有较好的耐久性和稳定性,预计可降低后期维护成本 40%以上。

5 推广价值

刁口河地处山东省东营市,全长约 130 km,流域面积约 1 914 km²,兼具防洪排涝、生态补水、农业灌溉等功能。该河流域同样属于黄河冲积平原地貌,地质条件与土马河流域高度相似,第四系松散沉积层厚度大,同样存在砂壤土层可液化、地基承载力偏低、渗流风险高等问题。流域内典型水利工程场地以第四系冲积砂壤土、壤土为主,饱和砂层分布广泛,浅部地层存在可液化风险,部分工程场地还存在浅层贝壳层、腐殖土层等特殊障碍物。近年来,刁口河流域水利工程(如河口节制闸、小型泵站)建设与修复过程中,多次面临地基处理难题。该流域水利工程的抗震设防要求与温家桥西闸基本一致,多数工程按地震动峰值加速度 0.10 g(Ⅶ度)设防,传统桩基方案因造价高、工期长等问题适用性受限。这为温家桥西闸水泥土桩基地基处理方案的推广提供了条件。

将温家桥西闸的水泥土搅拌桩设计参数(桩径 600 mm、桩间距 1.2 m、水泥掺入量 12%)应用于刁口河等同类工程时,核心设计逻辑可直接复用,仅需根据当地具体条件进行针对性调整,可大幅缩短工程设计周期。调整内容:一是可微调桩长。刁口河可液化土层埋深多为 0~4 m,桩长可设为 4~5 m;二是特殊土层应对方面,针对腐殖土对水泥浆强度的削弱作用,可适当提高水泥掺入量至 14%~15%,确保桩身 90 d 无侧限抗压强度不低于 1.5 MPa;三是障碍物处理方面,遇到浅层贝壳层时采用“浅层挖除、深层避让”的方式,避免设备损耗。在规模与温家桥西闸相近工程中,采用本研究提出的水泥土搅拌桩方案,同样可达到节省造价,缩短工期的(下转第 31 页)