ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

定西引洮调蓄水池工程湿陷性黄土地基处理施工技术与效益分析

马文氤　王　雪*　伍彦廷　刘灿显

广东理工学院，广东 肇庆 526000

摘　要：针对定西引洮供水工程调蓄水池场地Ⅲ－Ⅳ级自重湿陷性黄土含水率偏高且分布不均、素土挤密桩试桩出现缩孔塌孔、桩体压实度不达标的工程难题，通过室内配合比试验，采用 9% 掺量石灰改良灰土挤密桩。本文阐述地基处理设计要点、成孔回填施工工艺及全过程质量控制措施，并对处理效果与经济技术指标进行对比分析。检测表明，成桩后桩体压实度达 96.5%~98.2%，复合地基承载力特征值 325 kPa，满足 300 kPa 设计要求；与换填法相比，综合方案造价降低约 38%，工期缩短约 25%，弃土量减少约 80%，兼具技术、经济与环境效益，可为西北地区同类湿陷性黄土地基工程提供参考。

关键词：湿陷性黄土；灰土挤密桩；石灰改良；地基处理；施工质量控制

DOI：10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202610027

0 引言

我国西北地区黄土分布面积超过 60 万 km^2，湿陷性黄土占 70% 以上。湿陷性黄土在天然含水状态下强度尚可，一旦浸水饱和，土体结构迅速软化，产生显著的附加下沉，是西北地区建筑物倾斜、开裂乃至失效的重要原因之一[1]。随着引洮供水等重大水利工程的推进，大量调蓄水池不得不修建在湿陷性黄土地层上，如何经济可靠消除地基湿陷性，成为设计与施工重点。

湿陷性黄土地基常用处理手段包括垫层法、强夯法、挤密桩、换填法以及桩基础等。垫层和强夯更适用于处理深度浅或湿陷性较弱的场地；Ⅲ－Ⅳ级、处理深度超过 5 m 时，多采用挤密桩法。挤密桩利用成孔过程中对桩间土的横向挤压作用使土体密实，再以素土或灰土分层回填夯实形成复合地基，能同时起到消除湿陷性和提高承载力的双重作用[2]。但该工艺对土体含水率、填料性能敏感，含水率偏离最优含水率时，极易产生缩孔、塌孔、桩体压实不足等质量缺陷。

定西引洮调蓄水池场地属于大深度、含水率不利的湿陷性黄土地基，前期素土挤密桩试桩压实度无法达标。工程采用石灰改良灰土挤密桩，配套信息化施工管控，取得良好处理效果。本文从方案选型、施工工艺、质量管控、效益评价展开总结，供同类工程借鉴。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程基本情况

调蓄水池位于定西市安定区内官镇，属于黄土梁峁沟壑地貌，地面高程 1950~2000 m，年均降水量约 420 mm，蒸发量约 1500 mm，气候干燥，昼夜温差大。水池为圆形现浇钢筋混凝土结构，内径 450 m，池深 8.5 m，设计水深 7.8 m，有效容积 100 万 m^3，承担区域供水调蓄任务，供水范围内人口约 50 万。

该水池平面尺寸大，充水后基底压力均匀且数值高，地基局部湿陷变形极易导致池体混凝土开裂渗漏，因此地基处理是本工程的关键环节。构建筑关键处理区为Ⅱ区，面积约 1.2 万 m^2。

1.2 地基土工程特性

Ⅱ区地基土为马兰黄土，呈黄褐色，颗粒组成以粉粒为主，含量约 68.5%，黏粒约 19.2%，砂粒约 12.3%，孔隙比达 1.05，属典型的大孔隙、湿陷敏感性强的黄土。主要物理指标为：天然含水率 15.89%，液限 28.5%，塑限 17.5%，塑性指数 11.0，最大干密度 1.88 g/cm^3，最优含水率 15.36%[3]。室内计算与现场踏勘结果表明，场地属于自重湿陷黄土，湿陷等级为Ⅲ－Ⅳ级，总湿陷量约 280 mm，远超 GB 50025-2018 对此类建筑物地基剩余湿陷量的控制要求。

2 处理方案比选与设计

2.1 方案比选

针对Ⅲ－Ⅳ级自重湿陷性黄土地基，可选方案主要有换填法、强夯法和挤密桩法。换填法效果直观，但本工程处理深度达 5~6 m，需开挖外运土方约 6 万 m^3，造价高、工期长，大面积开挖还不利于边坡稳定和生态保护。强夯法受土体含水率限制，有效加固深度不足，试夯效果不理想。挤密桩法机械简单、填料可就地取材、处理深度灵活，更适配本工程。

挤密桩方案的主要难点在填料。素土在高

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

含水率条件下水稳性差，回填夯实后压实度难以稳定达到 96% 的设计要求，前期试桩已暴露出这一问题。为此，考虑在填料中掺入生石灰进行改良，利用石灰的水化吸水、离子交换和胶结作用改善填料性能。

2.2 石灰改良配比的确定

取自现场土样开展 0%、3%、6%、9%、12% 共五组石灰掺量室内试验，测试液塑限、击实、无侧限抗压强度以及微观结构。试验显示：随掺量增加，改良土塑性指数持续降低，可压实性提升；最大干密度逐渐下降，最优含水率相应上升；28 d 无侧限抗压强度在 9% 掺量时达到峰值 983.7 kPa，较素土提高约 3.2 倍；电镜观测 9% 掺量时土颗粒形成网状胶结，大孔隙占比降至 10% 以下，结构致密均匀 [4]。

从机理上看，生石灰消解生成的 $Ca(OH)_2$ 吸水放热，可在一定程度上降低填料含水率；Ca^{2+} 与黏粒表面阳离子交换使土颗粒凝聚团粒化，并经碳酸化和凝胶反应生成胶结物填充孔隙。宏观表现为改良土在较高含水率下仍能获得较高压实度，水稳性明显改善 [5]。综合力学性能与材料成本，确定桩体灰土石灰掺量取 9%。

2.3 设计参数

依据 GB 50025−2018 和 JGJ 79−2012 的有关规定，结合剩余湿陷量控制与承载力验算结果，设计采用桩径 400 mm、桩长 6.0 m 的灰土挤密桩，桩间距 1.2 m，按等边三角形布置，桩体按 9% 掺量灰土配制；复合地基承载力设计值 300 kPa；桩顶铺设 300 mm 厚级配砂石垫层，压实度不小于 95%。桩距的确定以挤密后桩间土能够达到设计密实度为前提，兼顾桩机行走便利性和成孔先后顺序对相邻桩孔的影响；处理平面范围在基础外缘适当外扩，使水池周边应力扩散区内的湿陷性土层同样得到处理。大面积施工前进行了工艺性试桩，试桩确认的参数作为大面积施工的控制依据，未经允许不得随意调整。

3 施工工艺与质量控制

3.1 施工准备

平整场地清表碾压，压实度≥ 90%；采用 RTK 放样定位，桩位偏差≤ 50 mm。选用优质生石灰，现场集中消解、过筛密封存放，避免碳化失活。灰土拌合站计量设备施工前完成标定。

3.2 成孔施工

采用 DZ−60 振动沉管成孔，成孔速度控制在 1.5 m/min，孔深偏差≤ 100 mm，孔径偏差≤ 20 mm。成孔后检查孔径、孔深和垂直度，并尽快回填，避免孔壁长时间暴露，防止吸水软化塌孔。针对局部含水率高、易缩颈区段，采取隔排隔桩跳打，为桩间土留出挤密和水分调整时间，改善成孔质量。

3.3 灰土拌合与回填夯实

灰土采用 JS500 强制式搅拌机集中拌合，石灰掺量误差控制在 ±1%，拌合料最优含水率 19.5%，现场控制在 19.0%~20.0%。拌合料随拌随用，堆放超时、含水率超差的拌合料禁止入孔。分层回填夯实，虚铺厚度≤ 300 mm，夯实后厚度约 200 mm，夯至桩顶标高。夯锤落距、夯击次数严格执行试桩确定参数，减少桩体密实度离散。分层过程抽样检测，桩体压实度≥ 96%。逐桩记录成孔时间、灰土批次、分层厚度、夯实施工情况，实现质量溯源。

3.4 桩顶与垫层施工

桩体施工完成后清除桩顶松散层，铺设 300 mm 厚级配砂石垫层并分层压实，压实度不小于 95%。垫层起到调整应力分布和水平排水的作用，是保证复合地基桩土共同受力的重要构造措施，施工中对级配和厚度逐段检查。

4 处理效果与效益分析

4.1 处理效果检测

成桩达到规定龄期后，对桩体压实度、桩间土挤密效果和复合地基承载力进行了检测，主要结果见表 1。桩体压实度实测为 96.5% ~ 98.2%，满足不小于 96% 的设计要求；载荷试验确定的复合地基承载力特征值为 325 kPa，高于 300 kPa 的设计值，较前期素土挤密桩试桩水平提高约 41.3%。桩间土在成孔挤密与灰土吸水胶结的共同作用下密实度明显提高，处理深度范围内桩间土湿陷系数经检测满足规范对剩余湿陷量的控制要求，水池基底以下湿陷性得到有效处理。

表1 地基处理效果检测结果

检测项目	设计要求	实测结果	结论
桩体压实度	≥ 96%	96.5% ～ 98.2%	合格
复合地基承载力特征值	≥ 300 kPa	325 kPa	合格
桩间土湿陷性	处理深度内消除	满足规范要求	合格
桩位偏差	≤ 50 mm	满足要求	合格

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

4.2 经济效益

以Ⅱ区约 1.2 万 m^2 的处理范围为基础，将本综合方案与换填方案进行对比，结果见表 2。综合方案虽然处理深度增加 1 m，但单位面积造价由 1280 元 /m^2 降至 793.6 元 /m^2，总造价由约 1536 万元降至约 952.3 万元，节省约 38%；施工周期由 60 d 缩短至 45 d；人工投入明显减少。造价降低的主要原因，一是生石灰单价约 300 元 / 吨，远低于换填所用级配砂石的 800 元 / 吨；二是挤密桩工艺无需大规模开挖和外运土方，机械与运输费用大幅减少。单从材料费用看，掺入石灰使灰土填料比素土填料略贵，但由此换来的压实性能改善使补桩、待工基本消除，工期与机械台班费用随之下降。

表2 综合方案与换填法经济性对比

对比项目	换填法	本综合方案	差异
处理深度 /m	5	6	+1
单位面积造价 /（元 /m^2）	1280	793.6	降低 38%
Ⅱ区总造价 / 万元	1536	952.3	节省 583.7
施工周期 /d	60	45	缩短 25%
人工投入 / 工日	1200	840	减少 30%
弃土量 / 万 m^3	6.0	1.2	减少 80%

4.3 环境效益

环境效益主要体现在三个方面。其一，换填法需将约 6 万 m^3 开挖土方运至 15 km 外的填埋场，本方案弃土量仅约 1.2 万 m^3，减少了约 80%，运输扬尘和交通压力随之明显下降。其二，机械总能耗降低约 30%，相应减少了施工期碳排放。

5 结语

（1）针对高含水率Ⅲ－Ⅳ级自重湿陷性黄土地基，在填料中掺入 9% 左右生石灰后用于灰土挤密桩，可显著改善填料的压实性能和水稳性，解决素土方案缩孔、塌孔和压实度不达标的问题，成桩后桩体压实度达 96.5% ~ 98.2%，复合地基承载力特征值 325 kPa，满足设计要求。

（2）成孔、拌合、回填、检测全过程的质量控制标准明确、可操作，配合 BIM 与定位、传感手段开展信息化管控，能够有效降低桩位偏差和返工率，缩短工序周期，是保证处理效果稳定的重要支撑。

（3）与换填法相比，本工程综合方案造价降低约 38%，工期缩短约 25%，弃土量减少约 80%，机械能耗降低约 30%，技术经济与环境效益兼备，方案思路对西北黄土地区同类工程具有参考价值。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 湿陷性黄土地区建筑标准：GB 50025-2018[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 建筑地基处理技术规范：JGJ 79-2012[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.

[3] 马文氤，伍彦廷 . 石灰改良黄土在定西引洮调蓄水池地基处理中的应用研究 [J]. 工程技术前沿，2025(7).126-129

[4] 谢潇，王璐瑶，邓乐娟，等 . 生石灰改良黄土的微观机制试验研究 [J]. 煤田地质与勘探，2021，49(6)：193-199.

[5] 梁志超，张爱军，任文渊，等 . 石灰改良黄土土水特征拟合模型及微观特性 [J]. 岩土工程学报，2022(z1)：241-246.

作者简介：马文氤（1995.10—），女，汉族，陕西咸阳人，硕士，助教，研究方向：岩土工程。
通讯作者：王雪（1995.12—），女，汉族，四川自贡人，硕士，讲师，研究方向：建筑与土木工程。
项目信息：2025 年广东理工学院校级科研项目“高含水率湿陷性黄土地基处理技术研究”（2025YBZK008）。