

卵石持力层中局部填土缺陷的地基强化处理方法研究

周恒学^{1,2} 乔晓峰^{1,2} 陈珂强^{1,2} 李伟^{1,2} 胡博涛^{1,2}

1. 中国建筑第六工程局有限公司, 天津 300450

2. 中建六局交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

[摘要]天然卵石层通常具备良好的力学性能,可作为建筑基础的直接持力层。然而,受人为活动或地表扰动较强的区域,卵石层内部可能混杂有各类填土体,导致局部地基承载力下降并诱发差异沉降风险。文章以西安建筑科技大学草堂校区项目为工程依托,该项目地基设计承载力为400kPa,基坑开挖阶段发现多处常规勘察未完全探明的填土坑病害。结合场地地质条件、设计指标与现场施工约束,构建清障开挖+分区置换+分层压实+全过程检测一体化地基强化体系。依据填土坑开挖深度划分浅坑、深坑两类工况,浅坑采用纯级配砂石垫层回填,深坑采用C20素混凝土与级配砂石组合适回填结构。文中系统阐述了回填材料配比、粒径控制、分层施工参数、界面处理、夏季高温养护等关键工艺,同时对比分析了高压注浆、复合地基、挖除换填三种主流地基处理技术的适用性。现场检测结果表明,经本方案处置后地基实测承载力均大于400kPa,压实系数、沉降变形等指标均满足规范及设计要求。该技术体系施工便捷、质量可控、经济性良好,可为同类型卵石地层局部软弱地基处置提供完整的工程参考与技术范式。

[关键词]天然地基;卵石层;杂填土;地基补强;级配砂石垫层;素混凝土回填

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19941

中图分类号: TU472.2

文献标识码: A

Research on Foundation Reinforcement Treatment Method for Local Fill Defects in Pebble Bearing Layer

ZHOU Hengxue^{1,2}, QIAO Xiaofeng^{1,2}, CHEN Keqiang^{1,2}, LI Wei^{1,2}, HU Botao^{1,2}

1. China Construction Sixth Engineering Bureau Corp., Ltd., Tianjin, 300450, China

2. China Construction Sixth Engineering Bureau Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311300, China

Abstract: Natural pebble layers usually have good mechanical properties and can be used as direct bearing layers for building foundations. However, in areas with strong human activities or surface disturbances, various types of fill soil may be mixed inside the gravel layer, leading to a decrease in local foundation bearing capacity and inducing differential settlement risks. The article is based on the Caotang Campus project of Xi'an University of Architecture and Technology. The foundation design bearing capacity of the project is 400kPa. During the excavation stage of the foundation pit, multiple soil filling pit diseases that were not fully explored by conventional surveys were discovered. Based on the geological conditions of the site, design indicators, and on-site construction constraints, an integrated foundation strengthening system is constructed, which includes clearing and excavating obstacles, zone replacement, layered compaction, and full process detection. According to the excavation depth of the fill pit, there are two types of working conditions: shallow pit and deep pit. The shallow pit is backfilled with a pure graded sand and gravel cushion layer, while the deep pit is backfilled with a combination of C20 plain concrete and graded sand and gravel. The article systematically elaborates on key processes such as backfill material ratio, particle size control, layered construction parameters, interface treatment, and summer high-temperature curing. At the same time, it compares and analyzes the applicability of three mainstream foundation treatment technologies: high-pressure grouting, composite foundation, and excavation and replacement. The on-site inspection results show that after the disposal of this plan, the measured bearing capacity of the foundation is greater than 400kPa, and the compaction coefficient, settlement deformation and other indicators meet the specifications and design requirements. This technology system is easy to construct, with controllable quality and good economic efficiency, and can provide a complete engineering reference and technical

paradigm for the treatment of local weak foundations in the same type of gravel strata.

Keywords: natural foundation; pebble layer; miscellaneous fill soil; foundation reinforcement; graded sand and gravel cushion layer; plain concrete backfill

1 研究概述

1.1 研究背景与工程意义

我国西北关中地区广泛分布着山前洪积扇地貌,该区域地层以卵石、圆砾、砂类土为主,形成年代久远、土体固结程度高。卵石地层凭借颗粒间强大的机械咬合力与嵌锁作用,表现出承载力高、压缩模量大、抗剪切性能优、渗透性良好等工程特性,在民用建筑、公共建筑、市政工程中大量直接用作基础持力层,有效降低地基处理成本,缩短施工周期。

在地基工程中,卵石层因其颗粒间咬合力强、压缩模量高,广泛被视为良好的天然持力层。然而,实际场地的形成过程常受古地貌变迁或人为活动干扰,局部区域可能出现填土、软土或空洞等缺陷体。若未在施工前发现并处理,这些缺陷将在上部荷载作用下引发基础不均匀沉降,严重时甚至导致结构破坏。

根据现行《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)要求,当地基持力层存在局部软弱土体时,必须结合缺陷规模、埋深、分布特征开展专项加固处理,保证地基整体受力均匀、变形协调。因此,针对卵石持力层内零散局部填土缺陷,研发一套安全可靠、工艺简单、造价低廉、适配现场工况的地基强化技术,具备极强的工程实用价值与行业推广意义。

1.2 国内外研究与技术现状

现阶段针对地基局部软弱缺陷的处置方式包含三类:原位注浆加固、复合地基改良、挖除换填处置。

原位高压注浆技术是通过高压浆液注入土体孔隙,胶结松散土体、填充地下空洞,多用于软土、粉土、碎石层空洞治理。该工艺优势为无需大面积开挖、机械化程度高,但对于成分杂乱、有机质含量偏高的杂填土,浆液胶结效果差,且无法彻底清除软弱土体,后期仍存在沉降隐患,同时零散小型填土坑难以精准定位注浆范围,加固均匀性无法保障。

复合地基技术主要通过布设水泥土桩、碎石桩、CFG桩等竖向增强体,结合桩间土共同承担上部荷载,大幅提升整体地基承载力。该技术适用于大面积软弱地基、整体承载力不足的场地,但施工工序繁杂、设备进场要求高,且会改变原有基础受力模式。对于本类已完成基础设计定

型的在建项目,采用复合地基会造成设计变更、工期延长、造价增加,现场落地难度较大。

挖除换填法是将浅层及局部软弱土体全部挖除,选用强度高、压缩性低的砂石、灰土、混凝土等材料分层回填压实,重新构筑人工持力层。该工艺原理简单、施工直观、质量易管控,能够彻底根除软弱土体隐患,是建筑基坑局部缺陷处置中应用最广泛的技术。国内众多学者与工程技术人员针对砂石换填垫层开展了大量研究,明确了级配配比、压实标准、变形特性等核心参数,但针对卵石地层深浅坑差异化回填、素混凝土与级配砂石组合结构、夏季高温施工养护等细分工况的专项研究仍相对偏少。

本项目原有基础形式、结构尺寸均已完成设计定型,不具备大规模地基改造条件。基于这一前提,本文围绕卵石层内局部填土缺陷开展专项研究,采用挖除置换组合工艺完成地基补强,详细阐述处置方案、施工工序、技术要点与质量检验标准,总结成套现场施工技术经验。

1.3 项目概况与研究内容

本次研究依托西安建筑科技大学草堂校区实验中心项目,建筑为多层框架结构,基础形式为独立基础+条形基础,地基持力层设计承载力标准值 400kPa。基坑开挖完成后,发现槽底分布多处未被前期勘察探明的杂填土坑。受项目整体进度、原有基础设计约束,本工程不允许采用大面积地基改造工艺。

本文以现场实际问题为导向,重点开展以下研究内容:第一,分析场地地质条件与填土缺陷的工程特性,梳理地基处理核心难点;第二,根据填土坑埋深划分工况,设计浅坑、深坑两套差异化回填构造方案;第三,明确回填材料配比、粒径、分层厚度、压实系数等设计参数;第四,总结界面处理、分层压实、夏季高温混凝土养护等现场关键施工控制技术;第五,对比三种主流地基处理工艺的适用性,论证本方案的合理性;第六,通过现场检测数据验证地基强化效果,提炼同类工程可借鉴的技术经验。

2 场地地质条件与问题分析

2.1 天然地基持力层特征

本项目选址于西安市鄠邑区西安建筑科技大学草堂校区,场地隶属于山前洪积扇地貌单元。前期岩土工程勘察成果表明,建筑物基础依托天然卵石层作为持力层,地

层主要组成物质为卵石、圆砾与中粗砂，土体整体密实状态良好，原状地层承载力可满足建筑使用需求，地层分布连续、稳定性较强。

2.2 现场探明的填土特征

基坑土方开挖完成后，发现槽底存在多处零散分布的填土坑。结合补充专项勘察结果可知，填土坑无固定分布规律，平面形态、开挖深度各不相同。坑内回填物质成分杂乱、结构松散、孔隙率大，物理力学性能远弱于周边原状卵石土体。若直接在该区域施作基础结构，局部地基承载能力不足，后期沉降变形难以控制，存在较大工程安全隐患。

2.3 处理难点与整体技术思路

本次地基补强工作存在两大核心难点：第一，需完整清除全部松散杂填土，不得遗留软弱土体或夹层；第二，保证置换回填体与原状卵石层协同受力、同步变形，避免新旧土体结合部位出现应力集中、滑移开裂等次生问题。

结合场地施工空间、工期要求及经济指标，本工程确定全范围清除软弱填土、按坑深分区定制回填结构、分层施工逐段检测验收的总体技术路线。根据填土坑清理完成后的有效深度，划分浅、深两类工况，分别匹配对应的回填工艺，实现精细化、差异化处置。

3 地基处理方案设计

3.1 杂填土开挖清除标准

针对专项勘察圈定的所有填土区域，采取人工配合小型机械开挖作业，将坑内全部松散填土清理干净，直至坑底、坑壁全部露出连续、稳定的原状卵石层。开挖全过程坚持保护性施工原则，严控机械作业力度，防止扰动坑体周边原有土体结构。同时结合坑壁土质、开挖深度动态采取放坡、临时挡护等措施，保障基坑边坡及坑壁稳定性。

3.2 基于坑深的分区回填构造设计

根据清理完成后坑底至基础垫层底面的垂直深度作为划分依据，设置两种回填构造形式，适配不同工况。

(1) 浅坑处理 ($h \leq 0.6\text{m}$)：深度不超过 0.6m 的浅层填土坑，整体采用级配砂石进行一次性分层回填，回填顶面标高与基础垫层底部标高保持一致，利用级配砂石高强度、低压缩性的特点，直接替代原有软弱填土。

(2) 深坑处理 ($h > 0.6\text{m}$)：深度大于 0.6m 的填土坑，采用素混凝土+级配砂石复合回填体系。首先浇筑 C20 素混凝土，浇筑顶面控制在基础垫层底面以下 0.6m 位置；混凝土施工采用分层分段连续浇筑方式，按照大体积混凝土标准落实温控与养护措施，保证混凝土内部密实、无空

洞、无裂缝。待混凝土强度达到设计要求后，在其上部铺设厚度 0.5m 的级配砂石垫层，垫层顶面与基础垫层底面齐平。

3.3 级配砂石垫层材料与压实控制

级配砂石是本工程核心回填材料，材料级配、粒径、拌合质量直接决定垫层承载力与压缩性能，结合规范及工程经验，制定严格的材料与施工参数：

重量配合比：卵石：圆砾：中粗砂=4：3：3。该配比可形成连续级配，大颗粒形成骨架，细颗粒填充孔隙，最大化提升垫层密实度与整体强度。

粒径控制：卵石粒径 20~40mm，最大粒径严禁超过 50mm；圆砾粒径 5~20mm；填充砂选用粒径小于 5mm 的洁净中粗砂，禁止使用含泥量超标的粉砂、淤泥质砂。

拌合要求：集中采用搅拌机强制拌合，现场少量区域可采用人工拌合，拌合时长不少于 3min，保证三种物料混合均匀，无局部离析、结块现象。

分层铺筑与压实：砂石料分层铺筑，单层铺设厚度 $\leq 250\text{mm}$ ，严禁超厚摊铺。采用振动夯、小型压路机进行压实作业，垫层整体压实系数 $\lambda_c \geq 0.97$ ，该标准高于常规垫层要求，确保地基长期变形稳定。

3.4 边坡稳定与坑底检验

填土全部清理完毕后，第一时间开展人工钎探检测，沿坑底、坑壁均匀布设钎探点，间距不大于 0.8m。通过钎探锤击数判断土体密实度，确认无残留软弱土体、空洞、夹层后，方可进入回填工序。

对于设置素混凝土的深坑区域，在混凝土浇筑前，委托具备资质的第三方检测机构开展地基静载荷试验。按照逐级加载、分级沉降观测的标准流程开展试验，确保原状卵石层地基承载力满足设计前置要求。

4 施工关键控制技术

4.1 混凝土与砂石垫层界面处理

素混凝土与上部级配砂石垫层属于两种不同力学性能的材料，结合面是复合结构的薄弱位置。为提升两层材料的结合强度，避免出现分层、滑移病害，制定专项界面处理工艺：

当 C20 素混凝土强度达到设计强度的 70% 后，采用人工凿毛方式处理混凝土顶面，凿毛深度控制在 3~5mm，彻底清除表面浮浆、松散颗粒。凿毛完成后，用高压水枪清理表面粉尘与杂物，待表面干燥后再铺设第一层级配砂石。粗糙的接触面可大幅提升两层材料的机械咬合力，保证复合结构整体协同受力。

4.2 分层密实度管控

级配砂石垫层压实采用先静压、后振动的组合碾压工艺,该方式可有效提升压实效果:第一步采用静压作业,使松散砂石初步成型,消除表层大孔隙;第二步开启振动模式,利用振动作用让颗粒重新排列、紧密嵌锁,进一步降低土体孔隙率。

每一层砂石压实完成后,现场随即采用灌砂法检测压实系数。单层压实系数达标后方可进行下一层铺筑;若检测不达标,立即补压并重新检测,全程闭环管控,确保所有垫层压实系数稳定在 0.97 以上。

4.3 混凝土养护与龄期管控

本工程深坑内浇筑的 C20 素混凝土按照大体积混凝土施工标准执行,采取保温、保湿养护措施,有效抑制混凝土内外温差,避免温度裂缝产生。混凝土连续标准养护时长不少于 14d,养护期间禁止重物碾压、扰动混凝土表面。待混凝土试块强度检测结果达到设计强度后,方可开展上部级配砂石垫层施工,杜绝因强度不足引发的结构变形。

5 多方案适用性对比分析

结合本工程卵石地层、局部零散填土坑的工况,对比高压注浆、复合地基、挖除换填三种常用工艺的综合性能:

高压注浆加固:高压注浆技术依靠水泥浆液填充土体孔隙、胶结松散颗粒,适用于整体孔隙发育、空洞集中的碎石地层。但本工程填土坑零散分布、单坑规模小,注浆点位难以精准布置,加固范围存在盲区;同时坑内杂填土含有建筑垃圾、有机质土,浆液胶结效果差,无法从根本上解决软弱土体问题,后期沉降风险较高,因此该工艺不适用于本项目。

复合地基加固:复合地基通过桩体与土共同承担荷载,主要用于大面积地基整体承载力不足的场地。该工艺需要大型成桩设备,施工工序多、周期长,且竖向增强体的布设会改变原有独立基础、条形基础的受力模式。本项目基础设计已全部完成,采用复合地基会引发重大设计变更,

延误整体工期、增加工程投资,现场实施可行性极低。

挖除换填工艺:本文采用的挖除置换回填工艺,可 100%清除全部杂填土,彻底消除地基软弱隐患;回填材料参数可控、施工直观,质量验收标准清晰;施工设备简单,无需大型机械进场,不改变原有基础形式,完美契合项目各项约束条件。同时该工艺造价低、施工速度快,回填体与周边卵石层变形协调性好,综合优势显著。

综合对比后,最终确定挖除置换回填为最优处置方案。

6 施工效果与结论

对于天然卵石层中存在的局部填土缺陷,采用“挖除+分级回填”的处理思路是可行的,既能消除软弱层,又能实现回填体与周边土体的协调变形。

根据缺陷深度选择不同的回填材料(级配砂石或素混凝土+级配砂石组合),可在保证承载力的前提下控制工程成本与施工难度。

施工过程中必须严格执行钎探试验、载荷试验及压实系数检测,为地基处理质量提供量化依据。

建议同类工程参照本文分级回填模式,结合地基承载力设计指标,建立标准化施工流程,提升局部地基缺陷处置的效率与质量。

[参考文献]

- [1]JGJ 79-2012 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[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2]GB 50007-2011 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [3]龚晓南.地基处理手册[M].第4版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [4]刘祖德,高大钊.土力学与地基工程[M].北京:中国水利水电出版社,2015.

作者简介:周恒学(1996—),男,汉族,甘肃天水人,天津理工大学本科毕业,助理工程师,现主要从事建筑行业方向。