

房屋建筑工程中复合地基施工技术应用研究

王孝升¹, 孙 铭²

(1. 东营通诚土地房地产资产评估有限公司, 山东 东营 257000;

2. 山东鲁正工程咨询有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要 复合地基是房屋建筑工程中软土地基处理的重要技术类型, 相比强夯、垫层等传统工法, 在控制地基沉降、提升承载能力方面优势显著, 直接关系到建筑结构长期安全稳定。为满足现代房建工程对基础施工的要求, 切实提高地基处理质量, 本文围绕复合地基施工技术展开研究, 从理论层面分析置换强化、协同承载、土体改良三大核心作用机理; 在实操层面, 结合散体材料桩、胶结材料桩等常见复合地基类型, 选取碎石桩、水泥土搅拌桩、灰土挤密桩及注浆加固等代表性技术, 详细阐述施工流程与关键工艺要点, 以期在现场规范化作业提供实操参考。

关键词 房屋建筑; 复合地基施工技术; 碎石桩; 水泥土搅拌桩; 灰土挤密桩

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.018

0 引言

随着我国城镇化进程加快, 房屋建筑工程数量持续增长, 高层化、大跨度成为主流发展趋势, 对地基承载能力和稳定性的要求日益提高。天然地基往往因承载不足, 易引发建筑不均匀沉降、结构开裂等病害, 严重影响建筑使用安全与耐久性。复合地基凭借“增强体+桩间土”的协同作用, 能有效改善软土地基工程特性, 当前工程实践中, 复合地基技术类型多样, 需明确复合地基作用机理, 根据不同类型技术的适用场景, 规范施工操作流程, 强化施工管控, 保障工程质量, 为房建工程基础施工提供可靠的技术支撑。

1 复合地基作用机理

1.1 置换强化

置换强化是通过喷浆搅拌、振动沉桩、注浆加固等技术手段, 在天然地基结构内设置增强体, 选用力学性能优异的级配碎石、水泥土、灰土作为置换材料, 通过改变土体性质来实现加固目的。从受力角度来看, 增强体在地基结构内呈现规则分布状态, 作为地基承载骨架, 负责承受大多数竖向荷载, 增强体间天然土体被称为桩间土, 利用桩间土侧向约束增强体, 杜绝倾斜失稳问题发生, 二者形成“骨架-基体”稳定结构^[1]。

1.2 协同承载

协同承载是复合地基与天然地基的核心区别, 施作多根桩体, 可选钻孔灌注桩、混凝土管桩、水泥土

搅拌桩和粉煤灰碎石桩, 桩体和桩间土保持协同受力状态, 共同承担上部结构荷载, 桩体主要承担 40%~80% 不等的竖向荷载, 由于桩体刚度远超地基土体, 二者基本保持一致沉降步调, 且总体沉降量不超出设计容许范围。如果上部荷载规模较大, 或是对地基沉降提出严格要求, 则以桩顶增设褥垫层、桩端后注浆作为补充措施, 进一步改善协同承载效果。

1.3 土体改良

土体改良机理适用于软土地基, 具备高压缩、高含水率的工程特性, 土体物理力学性能较差, 通过挤压密实效应、排水固结效应或是化学胶结效应, 从根本上改变土体物理力学性质, 从而增强地基承载能力。其中, 挤压密实效应是采取碎石桩振动沉管或是灰土桩沉管挤密工法, 径向挤压桩周土体, 通过提高密实度、减小孔隙比来提高土体抗剪强度。排水固结效应是把散体材料作为增强体, 在地基结构内构建竖向排水通道, 利用上部荷载或是临时堆载, 引导土体孔隙水向外排出, 提前完成绝大多数工后沉降量。化学胶结效应适用于注浆加固和水泥土搅拌桩技术, 水泥浆和土体颗粒均匀混合, 进行一系列化学反应, 以利用水化产物把土体颗粒胶结形成密实结构。

2 房屋建筑复合地基类型

2.1 散体材料桩复合地基

散体材料复合地基是选用无胶结强度散体材料作为增强体, 如碎石和砂石, 采取振动沉管成桩方式或

作者简介: 王孝升 (1989-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

是冲击成孔成桩方式,在天然地基内强制打入散体颗粒形成桩体,通过承担主要上部结构荷载,间接改善地基受力状态和强化承载能力。现场施工期间,主要采取碎石桩复合地基技术,选用 20~50 mm 粒径碎石作为散体颗粒,要求碎石含泥量低于 5%,桩体密实度超过 0.7,按照桩径值和地基类型来选择成桩方式,适用于普通多层住宅建筑和其他荷载较轻的房屋建筑工程。

2.2 胶结材料桩复合地基

胶结材料桩复合地基凭借化学胶结效应来实现地基加固目的,选用水泥、石灰等胶凝材料作为地基处理材料,强力搅拌地基土体,打破土体原状结构,同步喷射搅拌胶凝材料,胶凝材料和土体颗粒接触后进行一系列物化反应,最终固化形成特定形状尺寸、具备较高强度的刚性增强体^[2]。胶结材料桩复合地基技术路线众多,包括水泥土搅拌桩、水泥粉煤灰碎石桩等,适用于不同地质条件,无论是大荷载房屋建筑、高水位施工场景还是湿陷性黄土地基等特殊地基,都满足复合地基施工条件。

2.3 灰土桩复合地基

灰土桩复合地基是把石灰作为土体改良材料,根据 2:8 或是其他体积比,持续拌合灰土和地基土,先后进行水化反应、离子交换反应和胶凝反应,利用大量胶凝产物把松散地基土体胶结形成稳定结构,处理后的地基承载力达到 150~250 kPa 水准。目前,灰土桩复合地基主要用于解决湿陷性黄土、膨胀土在内的不良土层,桩径值控制在 0.3~0.45 m,桩距保持在 2~2.5 倍桩径值,操控沉管桩机在地基内打入钢管,分层回填夯实灰土,并在顶端铺设灰土垫层。

2.4 注浆加固复合地基

注浆加固复合地基本质上属于柔性增强体地基,向地基土体内高压注入水泥浆或是其他种类的化学浆液,浆液填充土体孔隙,胶结土体颗粒,从而提高土体抗剪强度和切断地下水渗流路径。此类复合地基主要用于已有建筑地基不强、不均匀地基处理等少数施工场景,作为一项辅助处理技术,以地基局部加固作为施工准则。

3 房屋建筑复合地基施工关键技术

3.1 碎石桩

碎石桩复合地基施工阶段,以振动沉管作为首选成孔方式,适用于松散砂土、粉质黏土等地基,技术要点如下:第一,桩机沉管。现场架设全站仪,按照设计图纸逐一测设各处桩位,桩位误差不得超过 ± 50 mm。

首处桩位部署振动沉管桩机,按照桩径值来选择相应振动频率与激振力的桩机,测量调整桩机水平度、桩管垂直度,以水平度误差小于 0.5%、垂直度误差小于 1% 作为合格标准。启动桩机,匀速把桩管下沉至持力层,松散砂土层沉管速度为 1~1.2 m/min,粉质黏土层沉管速度为 0.8~1 m/min,沉管深度偏差不得超过 ± 100 mm,并在桩管抵达设计位置后,持续振动 30 s 来穿透持力层表面松散层^[3]。第二,填料入管。桩管就位后,衔接开展填料入管作业,尽量选用 20~50 mm 粒径花岗岩碎石当作填料,以含泥量低于 5%、饱和单轴抗压强度超过 30 MPa 作为合格标准。分多次向桩管内投入填料,实际填料量控制在 1.2 倍桩管容积,且实际填料高度保持在 1.5 m 以上。第三,振动拔管。交错开展填料、拔管作业,填料后启动振动锤,持续振动 10 s,解决填料堆积偏斜和卡料问题,再按照 1~1.5 m/min 速度拔管,每拔管 1 m,开展 1 次补料作业,始终保持管内填料饱满状态。第四,桩顶处理。完全拔出桩管后,桩顶预留松散砂土层,预留厚度为 0.3 m,切换小型冲击夯,分层开展夯击作业,单层夯击遍数为 3 遍,先后保持轻夯模式和重夯模式,直至桩顶压实度超过 0.95。

3.2 水泥土搅拌桩

第一,桩机就位。优先配备 SJB-II 型桩机,带有双螺旋搅拌叶片,有助于强化搅拌效果和提高成桩速度。按照设计图纸测设各处桩位,桩位中心点打入木桩作为施工标识,确认成桩顺序。首处桩位上部署深层搅拌桩机,调整桩机水平度与垂直度,设置注浆管,注浆管连接输送泵,以桩机平面位置误差小于 ± 50 mm、水平度误差小于 0.5%、搅拌轴垂直度误差小于 1% 作为合格标准。第二,浆液制备。按照现场施工进度来决定制备时间,选用 42.5 级普通硅酸盐水泥即可,水灰比保持在 0.5~0.7 区间,水泥掺量控制在 15% 土体质量,持续搅拌 2 min 以上时间,利用滤网滤除杂质,并把浆液存放时间限制在 2 h 内。第三,搅拌成桩。启动桩机下沉搅拌地基土体,搅拌转速保持在 30~50 r/min,下沉速度保持在 0.5~1 m/min,同步向外喷射浆液,注浆压力保持在 0.3~0.5 MPa,注浆量偏差限制在 5% 以内。搅拌轴顺利抵达桩底位置后,原位继续旋转搅拌叶片和喷射水泥浆,原位保持时间为 30~60 s,直至水泥浆和土体颗粒均匀混合。反向启动搅拌电机,向上提升搅拌轴和继续喷射水泥浆,注浆压力保持不变,提升速度控制在 0.3~0.5 m/min,持续提升至桩顶位置,原位保持 30~60 s 旋转喷浆,完成单次提

升搅拌过程^[4]。重复上述操作,开展复搅作业,复搅次数越过,成桩效果越好,但也会延长工期时间,正常工况下,采取二搅二喷工艺,必要时采取四搅四喷工艺。

此外,面向黏性土、粉土等正常地基,则采取干法搅拌桩技术,即为粉喷桩,利用干燥无结块水泥粉替换水泥浆,配备 PH-H 型粉喷桩机替换 SJB-II 型深层搅拌桩机。现场施工期间,按照标准工艺做法把桩机部署就位,省略浆液制备环节,选用 42.5 级水泥粉,以粒径小于 0.08 mm 作为质量要求,水泥掺量增加至 15%~20% 土体质量。准备工作完成后,启动桩机下沉搅拌,搅拌转速为 30~50 r/min,下沉速度为 0.5~1 m/min,抵达桩底上方 0.5 m 位置后,利用空压机高压喷入水泥粉,喷粉量为 15~20 kg/m,桩底原位喷粉搅拌 30 s。衔接开展搅拌提升作业,提升速度保持在 0.3~0.5 m/min,喷粉量保持不变,提升至地面后二次下沉复搅,复搅深度控制在 2/3 桩长位置。

3.3 灰土挤密桩

第一,桩机就位。现场配备 DZ-40 振动沉管桩机,操控全站仪测设桩位,桩机部署就位,保持机身水平和桩管竖直状态,桩管中心点和桩位中心点完全重合。第二,沉管挤密。启动桩机,凭借桩机重量和振动能量来突破桩管入土阻力,沉管速度稳定维持在 0.3~0.5 m/min,并保持 15~20 Hz 振动频率,一次性完成沉管作业,顺利抵达桩底标高位置,桩端进入持力层深度超过 0.3 m。原位振动 20~30 s 后,匀速向上拔除桩管,拔管速度为 0.5~0.8 m/min,暂时形成桩孔。第三,填料夯实。提前拌合灰土,以生石灰和粉质黏土作为原材料,筛除杂质后,按照 2:8 或是 3:7 的体积比进行拌合,拌合时间超过 3 min。桩孔成型后,立即填入灰土,分层开展填料夯实作业,单层厚度为 0.2~0.3 m,选用 1 t 以上夯锤,夯锤落距设定为 2~3 m,单层夯击次数控制在 6~8 击,以锤击下沉量小于 20 mm、压实系数超过 0.95 作为结束标准。第四,铺设垫层。用于强化灰土挤密桩和桩间土的协同受力条件,确保桩身承受主要竖向荷载。桩顶预留 5 cm 压实余量,铺设灰土垫层,垫层厚度为 0.3~0.5 m,无需调整灰土配比,操控小型压路机连续碾压多遍垫层,以垫层压实系数超过 0.95、标高误差小于 20 mm 作为合格标准^[5]。

3.4 注浆加固

房屋建筑地基注浆加固施工阶段,按照地基类型来选择注浆技术,主流技术包括渗透注浆、劈裂注浆等,工艺做法略有不同。以渗透注浆技术为例,适用于高

透水性土层,利用较低压力引导浆液渗透填充土体颗粒间隙,保留土体原状结构,形成网状胶结体系。劈裂注浆则适配低透水性软黏土层,通过提升注浆压力使浆液劈裂土体形成浆脉,与原状土结合形成复合固结体,施工前需现场做注浆试块,确定劈裂压力与浆液扩散半径关键参数。地基薄弱部位钻设孔洞,孔内插入无缝钢管作为注浆管,末端按照梅花形开设 5~8 mm 直径的注浆孔,同步制备水泥浆,要求初凝时间超过 45 min,终凝时间小于 10 h。注浆管安装后需对孔壁进行封孔处理,采用水泥砂浆封堵孔口 0.5~1 m 范围,防止注浆过程中出现浆液冒浆、串浆问题,保障注浆压力稳定。准备工作完成后,分段开展注浆作业,单段注浆长度为 1.5~2 m,注浆压力保持在 0.5~1.5 MPa,注浆速度保持在 0.5~1 L/min,各段注浆方法保持一致。注浆施工遵循由下至上、隔孔跳打的原则,相邻注浆孔施工间隔不低于 4 h,避免相邻孔位浆液相互干扰,确保注浆加固的均匀性与完整性。最终以注浆压力达标并稳定保持 30 min 以上、实际注浆量超过 1.2 倍设计值作为终止注浆条件,孔内填入水泥砂浆进行封堵处理。

4 结束语

复合地基作为房屋建筑施工体系的重要内容,也是保障地基承载能力、长期维持上部结构稳定状态的重要支撑。在房屋建筑高层化、大跨度发展背景下,建筑施工人员应加强复合地基施工技术应用力度,全面推行标准化施工模式,熟练掌握各项复合地基施工技术的正确工法,积累施工经验,凭借技术助力,推动房屋建筑工程建设质量稳步提升。

参考文献:

- [1] 宋建国,刘杰,徐炳强.房屋建筑工程中复合地基施工技术应用[J].中国建筑装饰装修,2025(17):184-186.
- [2] 房慧,王海霞.市政建筑工程地基施工技术的关键点分析[J].居业,2025(07):49-51.
- [3] 张第,刘宏昊.岩溶地区建筑工程 CFG 桩复合地基施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):128-130.
- [4] 张辉,陶庆洋.管桩与塑性混凝土增强型复合地基施工技术研究[J].治淮,2025(05):58-61.
- [5] 钱新文,杜玉芬.高层建筑钢筋混凝土桩复合地基施工技术[J].科技创新与应用,2023,13(30):177-180.