

复杂工况下土木工程地基加固处理方法对比

李 明 高建雄

陕西煤业化工建设（集团）有限公司路桥分公司 陕西 西安 710021

摘 要：本文针对软土地基、岩溶地基、高填方地基及地震区地基等复杂工况，系统阐述了换填垫层法、夯实法、挤密桩法及注浆加固法四类常用地基加固方法的技术原理与核心要求，并从适用工况、加固效果、施工要点及经济成本四个维度进行了对比分析。结果表明：换填垫层法适用于软弱土层厚度小于 3m 的浅层地基，成本最低但加固深度有限；夯实法尤其强夯法适用于深层地基，可消除湿陷性与液化性，承载力可提升 50% 至 100%；挤密桩法通过复合地基作用控制不均匀沉降优势突出；注浆加固法对隐蔽性缺陷处理效果最优但成本最高。工程实践中应综合比选，实现技术性能与经济合理性的最优平衡。

关键词：复杂工况；土木工程；地基加固；处理方法；对比分析

引言：随着我国基础设施建设向复杂地质区域不断延伸，软土地基、岩溶地基、高填方地基及地震区地基等复杂工况日益增多，传统单一加固方法已难以满足工程对承载力、变形控制及耐久性的综合要求。地基加固质量直接关乎结构安全与使用寿命，科学选型尤为关键。当前换填垫层法、夯实法、挤密桩法及注浆加固法是最为常用的四类技术，各方法在适用工况、加固效果、施工要点及经济成本方面差异显著。本文系统阐述四类方法的技术原理，并从上述四个维度进行全面对比分析，旨在为复杂工况下地基加固方法的科学选型与方案优化提供系统参考。

1 复杂工况下地基加固的核心要求

复杂工况下地基加固的核心目标在于通过针对性的技术手段，系统性改善地基土的物理力学性质，显著提升地基承载力、抗变形能力及整体稳定性，将地基沉降量严格控制在设计允许范围之内，同时须兼顾施工可行性与经济合理性，确保加固方案在技术性能与工程投入之间取得最优平衡。不同复杂工况对地基加固的技术侧重点存在显著差异。（1）软土地基因含水量高、孔隙比大、压缩性强、抗剪强度低，加固核心在于降低土体含水量、减小孔隙比，通过排水固结或置换处理有效提升地基承载力，同时控制工后沉降速率与总量。（2）岩溶地基因存在溶洞、溶蚀裂隙、地下暗河等地质缺陷，岩土体完整性严重受损，加固核心在于充填地质缺陷、恢复地基整体性，防止不均匀沉降与突水突泥等工程事故。（3）高填方地基因填筑体厚度大、压实度不均，加固核心在于分层压实加固、改善填筑体密实度，有效控制不均匀沉降与差异变形。（4）地震区地基因土体在动

荷载作用下易发生液化或剪切破坏，加固核心在于提升地基土的抗液化能力与抗剪切强度，确保结构在地震作用下的安全性^[1]。

2 复杂工况下常用地基加固处理方法及原理

2.1 换填垫层法

换填垫层法是通过挖除地基表层一定深度范围内的软弱土层或不良土层，以强度高、稳定性好、压缩性低且渗透性强的工程材料（如级配砂石、灰土、素混凝土、矿渣等）进行置换，经分层回填压实或振捣夯实后形成具有一定厚度的人工垫层，从而有效提高地基承载力、减小地基沉降量、加速地基排水固结的地基加固方法。（1）该方法的核心加固原理在于：利用换填材料远高于原状软弱土的抗剪强度与压缩模量，直接承担并扩散上部结构传来的荷载，显著降低垫层底部的附加应力，减少地基总沉降量与差异沉降。同时，换填材料良好的渗透性能为地基土体提供竖向排水通道，加速孔隙水排出，缩短排水固结时间，改善地基的变形特性与强度增长速率。（2）换填垫层法具有施工工艺成熟、操作流程简洁、对施工机械设备要求较低、工期短且造价经济等优势，适用于浅层软弱地基的加固处理，尤其适合软弱土层埋藏较浅、厚度通常小于 3m 的复杂工况^[2]。但该方法不适用于软弱土层厚度较大的场地，且换填深度受开挖与回填施工条件限制，需结合具体工况合理确定换填深度与垫层材料类型。

2.2 夯实法

夯实法是通过重锤自由下落产生的冲击能或振动力，对地基土施加反复冲击与压实作用，使土体颗粒

重新排列、孔隙体积减小、密实度增大,从而有效提升地基承载力与抗剪强度,同时消除地基的湿陷性或液化潜力的地基加固方法。该方法依据锤体质量与落距的不同,主要分为重锤夯实法与强夯法两种技术类型。(1)重锤夯实法采用质量通常为10t至20t的锤体,利用其自由下落产生的冲击力对地基表层土体进行反复夯实,有效压实深度一般为1m至2m,适用于浅层地基的加固处理。强夯法则采用质量更大的锤体(通常20t至40t)配合更大的落距(10m至30m),单次冲击能量可达数千千焦,冲击力可有效传递至地基深层5m至15m范围,适用于深层地基的大面积加固处理。(2)夯实法加固效果显著,施工效率较高,对碎石土、砂土、粉土、黏性土等多种土层均具有良好的适用性,尤其适合处理湿陷性黄土、液化砂土、杂填土等复杂工况下的地基加固工程。施工过程中须严格控制单击夯击能、夯击次数与间隔时间等参数,确保加固质量满足设计要求。

2.3 挤密桩法

挤密桩法是通过在地基中采用锤击、振冲或钻孔灌注等方式成桩,形成砂石桩、灰土桩、水泥土桩等桩体,利用桩体施工过程中对桩周土体产生的径向挤密作用,使桩周地基土颗粒发生强制位移与重新排列,孔隙比显著降低、密实度明显提升,同时桩体与桩周土共同构成复合地基,协同承担上部结构传来的荷载,从而有效提升地基承载力、控制地基沉降量的加固方法。(1)其核心加固原理包含两个层面:一是桩体成桩过程中的挤密效应,桩体挤入或置换原有土体,桩周土受到强烈侧向挤压,土颗粒重新定向排列,土体干密度增大、抗剪强度提高;二是复合地基的协同承载作用,桩体作为高强度、高模量的增强体,与桩间土共同承受荷载,桩体承担大部分应力,桩间土承担剩余应力,整体承载力与变形模量均显著高于天然地基。(2)不同类型挤密桩适配不同土层条件:砂石桩适用于砂土、粉土等渗透性较强的土层,成桩过程中兼具挤密与竖向排水固结功能;灰土桩与水泥土桩适用于黏性土、粉土等低渗透性土层,桩体材料可与地基土发生离子交换、火山灰反应等化学作用,进一步增强桩土界面粘结力与地基整体性。该方法加固深度一般可达5m至15m,适用于深层软弱地基、液化地基、湿陷性黄土地基等复杂工况^[3]。

2.4 注浆加固法

注浆加固法是利用注浆设备将具有胶结性能的浆液(如水泥浆、水泥砂浆、化学浆液、超细水泥浆液等)在一定压力作用下注入地基土的孔隙、裂隙、溶洞或空洞中,浆液经扩散、渗透、充填后凝固硬化,与周围土

体胶结成整体,从而有效提升地基承载力、增强土体整体性与改善抗渗性能的加固方法。(1)该方法的核心原理在于利用浆液的胶结与充填作用,占据地基土中的空隙与缺陷部位,固化后将松散或破碎的土体粘结为具有一定强度的复合体,显著改善地基土的物理力学性质,包括提高抗剪强度、增大压缩模量、降低渗透系数等。(2)根据注浆材料的不同,可分为水泥注浆与化学注浆两大类。水泥注浆材料来源广泛、成本较低、耐久性好,适用于砂土、粉土、黏性土等大多数土层的加固处理;化学注浆浆液黏度低、流动性好、胶结强度高,适用于裂隙细小、渗透性差、常规浆液难以注入的地层,但材料成本较高且部分化学浆液存在环保风险。注浆加固法适用范围广泛,尤其适合岩溶地基、裂隙发育地基、既有建筑地基加固及地下工程渗漏治理等复杂工况。

3 复杂工况下各类地基加固方法对比分析

3.1 适用工况对比

换填垫层法主要适用于浅层软弱地基的加固处理,软弱土层厚度通常小于3m,如浅层淤泥、淤泥质土、素填土、冲填土等工况,该方法对深层地基的加固效果有限,且受开挖深度与施工场地条件制约。(1)夯实法依据锤体质量与落距的不同,适用范围有所区分:重锤夯实法适用于1m至2m深度范围内的碎石土、砂土、粉土及黏性土等浅层地基;强夯法适用于湿陷性黄土、液化砂土等深层地基工况,有效加固深度可达5m至15m,对多种土层均具有良好的适用性。(2)挤密桩法适用于深层软弱地基、液化地基、湿陷性黄土地基等复杂工况,加固深度一般可达5m至15m,可适配砂土、粉土、黏性土等多种土层,尤其在处理可液化地层与湿陷性地层方面优势突出^[4]。(3)注浆加固法适用范围最为广泛,可用于岩溶地基、裂隙发育地基、既有建筑地基加固及深层软弱地基等各类复杂工况,尤其适合地基存在溶洞、溶蚀裂隙等隐蔽缺陷的场景,能够有效填充并胶结地层内部缺陷,恢复地基整体性。

3.2 加固效果对比

换填垫层法可显著提升浅层地基承载力,有效减小浅层沉降量,但由于其加固范围仅限于浅层,对深层地基变形控制效果较差,加固后地基承载力提升幅度相对有限,通常在20%至50%之间,且随换填深度增大,性价比显著降低。(1)夯实法加固效果显著,可大幅提升地基承载力,其中强夯法可使承载力提升50%至100%,有效控制深层沉降与差异变形,同时能从根本上消除地基的湿陷性与液化性,适用于对加固效果要求较高的复

杂工况,是处理湿陷性黄土与液化砂土地基最为有效的方法之一。(2)挤密桩法通过桩体与桩周土的协同承载作用形成复合地基,可同时提升地基承载力与抗变形能力,加固效果稳定且持久,承载力提升幅度一般在30%至80%之间,能有效控制不均匀沉降,在处理可液化地基与湿陷性黄土地基方面表现突出。(3)注浆加固法可针对性填充地基内部缺陷,显著提升地基整体性与抗渗性能,对溶洞、裂隙等隐蔽性缺陷的处理效果优于其他方法,但其承载力提升幅度受浆液性能、注浆压力及注浆工艺等因素影响较大,通常提升幅度在30%至70%之间,加固效果的稳定性与均匀性需通过严格的注浆参数控制加以保障。

3.3 施工要点对比

换填垫层法施工流程简洁,主要包括挖除软弱土层、分层铺设换填材料、逐层压实夯实三个步骤,对施工机械设备要求较低,施工速度快、工期短,但须严格控制换填材料的级配组成与压实度,分层铺设时须避免出现层间夹泥、松散或架空等质量缺陷。(1)夯实法施工核心在于控制锤体质量、落距与夯击次数,其中强夯法施工前须进行试夯,确定最佳单击夯击能、夯击遍数与间隔时间等参数,施工过程中须严格监测地面振动,采取隔振措施,避免对周边既有建(构)筑物及地下管线产生不利影响^[5]。(2)挤密桩法施工须严格控制桩位偏差、桩长、桩径与压实度等参数,钻孔浇筑类桩体须控制浆液配合比与浇筑连续性,防止出现断桩、缩颈、夹泥等质量缺陷,确保桩体完整性与均匀性。(3)注浆加固法施工核心在于控制注浆压力、注浆量与浆液配比,须根据地基土层特性与缺陷分布合理布置注浆孔位与间距,确保浆液在地基中均匀扩散与充分充填,避免出现注浆不足导致加固盲区或过度注浆引发地面抬升等问题。

3.4 经济成本对比

换填垫层法经济成本最低,所用换填材料来源广泛、价格低廉,施工工艺简单、工期短,设备投入少,单位面积加固成本仅为其他方法的三分之一至二分之

一,是浅层地基加固中经济性最优的方案。(1)夯实法成本处于中等水平,其中重锤夯实法成本略低于强夯法。强夯法因需投入大型起重设备、高能量夯锤,且施工前须进行试夯确定参数,试夯成本较高,单位面积成本高于换填垫层法,但低于挤密桩法与注浆加固法。(2)挤密桩法成本较高,桩体材料消耗大、专用施工设备投入多,单位面积成本约为换填垫层法的2至3倍,且随着加固深度增加,桩长与桩数同步增长,成本呈显著上升趋势。(3)注浆加固法经济成本最高,化学注浆因浆液单价高、施工工艺复杂、设备精度要求高,单位面积成本约为换填垫层法的3至5倍;水泥注浆成本相对较低,但仍高于夯实法与挤密桩法,且注浆量难以精确控制,易造成材料浪费。

结束语

复杂工况下地基加固方法的科学选型是保障工程安全与控制造价的核心环节。本文通过系统对比明确了各类方法的技术优势与适用边界:换填垫层法经济高效但深度受限,夯实法加固效果显著且适用土层广泛,挤密桩法在控制不均匀沉降方面优势突出,注浆加固法对隐蔽性缺陷处理能力无可替代。实际工程中应结合地质条件、加固目标及经济约束多方案比选,必要时可采用联合加固策略,以实现复杂工况下地基加固的最优效果,为土木工程地基处理提供可靠技术支撑。

参考文献

- [1] 赵博兴.复杂地质条件下土木工程地基处理与加固方案优化研究[J].陕西建筑,2025(5):11-14.
- [2] 王鹏.地基加固技术在土木工程结构设计中的应用[J].工程抗震与加固改造,2025,47(1):197-197.
- [3] 吴海洋.土木工程地基处理技术与工程实践研究[J].工程与技术研究,2025,8(14):135-137.
- [4] 柯珍.土木工程建设中地基加固技术运用与分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(6):0013-0016.
- [5] 张全.土木工程地基处理中的新型加固技术探讨[J].美食,2024(14):34-35.