

软土地基加固传统技术及新兴技术

李 总 夏 天 张志成 马润龙 张 涛

中国建筑第八工程局有限公司 上海 201108

【摘 要】：岩土工程随着国家经济发展持续演进，“一带一路”倡议推动项目数量增长与工程复杂度提升，对施工质量提出更高要求。地基作为岩土工程核心基础设施，其加固技术是保障工程顺利进行的关键。科学选择加固方案可有效提升地基整体稳定性，增强荷载承载能力，实现建设要求与经济效益双提升。本文依次阐述软土工程特性，解析典型破坏机理，系统梳理传统加固工艺，以及新型加固技术的展望。

【关键词】：软土地基；加固技术；传统技术；新兴技术

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.010

引言

由于我国经济的快速发展，大部分沿海城市成为主要经济贸易发展中心，城市的不断发展使得越来越多的工程建设面对各种软体地基问题。软土地基含水量高、孔隙比大、承载力低容易发生水层渗透，在这种地基修筑建筑物会面临很大的安全隐患，因此，在软土地基修建建筑物时，对地基加固处理以提高地基承载能力是首要任务，减少工程完工后的最大沉降量。

1 软土的工程性质

多数软土是因在静水或慢流水环境中沉积而形成的饱和黏性土，主要是细颗粒近代沉积物，包括淤泥和淤泥质土。软土具有高含水量（液限 40%~50%）、大孔隙比及显著流变性特征，其渗透性低导致固结周期长，抗剪强度与加载速率及排水条件密切相关；且软土呈现触变特性，动态荷载触发液化与结构破坏，导致强度骤降，荷载撤除后，强度与结构呈渐进式恢复。

2 软土地基破坏类型及原因分析

2.1 软土地基往往破坏类型

软土地基的工程性质决定了其在静荷载与动荷载作用下内部应力发生变化和产生较大变形，影响结构稳定性。多数表现在：（1）抗剪强度欠缺导致剪切破坏；（2）地基发生不均匀沉降变形；（3）受动荷载作用致使地基液化失稳。

2.2 破坏原因分析

2.2.1 勘察设计不仔细，不认真对待

因技术人员素质局限，前期勘察阶段存在疏漏，导致加固设计偏差及方法失当，最终阻碍施工进度并影响设备运作。

2.2.2 软土地基处理方法不合适

需明确各处理方法适用条件及扰动效应，结合现场软土特

性与环境选配合套方案，否则易引发失稳并加剧安全隐患。

2.2.3 施工技术程度不高

因我国工业化进程相对滞后，从业人员多源自传统施工队伍，系统技术教育缺失且设备陈旧，导致地基施工技术体系尚待完善，难以适应市场经济需求。实际工程中常出现规划、施工及质控环节脱节，施工标准化程度不足，最终影响技术实施效果。

3 岩土工程地基加固的重要性

地基加固在岩土工程中至关重要：其一，工程成败、使用寿命及使用安全均直接依赖地基稳定性，忽视加固将导致沉降变形风险；其二，科学加固可控制变形在允许范围，显著提升承载力与工程安全度；其三，有效防控渗透问题，解决水涌入及地基腐蚀等隐患。

4 软土地基处理方法的选用原则

地基处理方法有很多，方法的优缺点及适用范围不同，应根据工程实际情况综合考虑各种影响因素，来选择适合该地基处理的最优方法。地基处理方法的选用应当考虑以下原则：

（1）处理方法应与工程的规模、特点和地基土体的类别相匹配；（2）地基处理后的加固深度；（3）工程上部结构的影响；（4）能方便提供的处理材料；（5）能选用的机械设备，并掌握其加固工作原理与技术；（6）周围环境因素和相近建筑的安全；（7）对施工工期的要求；（8）施工队伍的技术素质；（9）施工技术条件与经济技术比较，尽量节省材料与资金。

总而言之，应做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量、因地制宜、就地取材、保护环境、节约资源。

5 软土地基处理惯用方法

5.1 换土垫层法

换土垫层法作为浅层地基处理技术,通过人工挖除表层软弱土体,置换高强度、低压缩性的砂土、碎石土、矿渣等稳定材料,经分层夯实形成符合干密度要求的持力层。该工艺采用机械碾压、振动碾压及重锤夯实等方式实现压实,有效改善地基承载性能。实际工作当中主要关注如下几点:

(1) 换土垫层法一般适用于比较浅的软土地基。(2) 地基土实现换填的过程中,软土和暗沟要进行处理,确保地基中的软弱土层能被彻底清除,然后用坚硬的砂石进行回填,以此地基稳固性得以加强,增强地基的承载力。(3) 砂石本身具有坚硬的特质,因此在用于回填之后,可以与垫层下面土层组合成一个双层地基或者复合地基,以此进一步加大地基的承载力。(4) 砂石自身具有的排水性能,制作排水层来降低地下水对地基的不利影响,确保了地基的稳定性。这种方法在房建中适用非常广泛,可以确保建筑工程质量。

5.2 动力加固法

土体动力加固通过动力作用施加夯击能,重塑土体颗粒排列,形成密实稳定结构,从而提升土体力学性能。普遍情况下,这个方法主要是借助于夯锤的力量给地基加强力量,迫使深层土液化和动力固结,以致土体密实。通常利用夯锤重量为10~40t,使它吊起至10~40m高处自由落体,对地基产生巨大的冲击力。因此,动力加固会达到一个良好的加固效果,普遍用在地基处理工程中。动力加固法对预防粉土与粉细砂液化也会达到较好的水平,其主要应用于黄土、砂土、碎石土、低饱和度的粉土、人工填土及杂填土地基当中。

我们应科学、合理进行重力夯实,以防止重力过大对周围建筑物的稳定性产生影响,也易产生较大噪音和冲击波。需要注意的是,动力加固会产生巨大的冲击力,很难控制夯位,所以对含水量较高的粘性土质使用该方法效果不佳,容易产生橡皮土等不良现象,淤泥及淤泥质土地基也慎用。

5.3 深层搅拌法

深层搅拌法作为厚层软基处理技术,通过特制深层搅拌机在地基深处强制拌合软土与水泥、石灰等无机结合料,引发物理-化学作用形成水泥土或石灰土复合地基。该工艺可提升地基承载力,并在加固深度范围内实现沉降量减少1/3至2/3,有效改善软土地基工程性能。

利用深层搅拌法处理淤泥、淤泥质土等压缩性强、孔隙比大的软土地基时,将会取得承载能力显著提高的效果。对于地基承载力不超过120kPa的粘性土和粉土等土层同样适用深层

搅拌法进行处理。但是对于土体含有大量有机质或含有腐蚀性地下水的粘性土,在选用深层搅拌法处理地基前应进行试验确定其是否适合。与其他地基处理方法相比,深层搅拌法具有加固深度较深的优点,最深可达12m左右。但是该方法处理地基时,其工程造价较高。所以减少工程费用也是现在及今后的重点研究课题,也是发展趋势。

5.4 排水固结法

通过利用土体本身的透水性或设置在地基中增加排水系统和加压系统,将软土层内部的孔隙水挤出结构内部,从而达到使软土层逐渐固结的目的。继而改善土体性质,增加地基承载能力。地基排水方式较多,可以使用建筑物本身重量或预先堆载的方法来促进土层排水固结;或者使用设置在土体中的排水及加压系统,通过机械抽取的形式促使地基土体固结;也可以在地基中插入金属电极通过直流电作用将孔隙水从阳极引流到阴极,然后将汇聚在阴极的水排出,土体也因此逐渐排水固结。

在工程中排水固结法运用主要体现在堆载预压法、降水预压法、砂井堆载预压法、真空预压法、联合预压法等。堆载预压法没有在土体中布置排水体,依靠土体自身作为排水系统,所以此方法为一维固结排水。后两种排水方式安装了排水体属于三维固结排水。砂井预压法和真空预压法相对比,砂井预压法通过地表堆载增总应力,伴孔压消散促有效应力增长,引发土体固结;相比之下,真空预压法则是通过抽出覆盖土体表面薄膜的内部压力,由降低膜内土体中的压力,总应力恒定下增有效应力,相较堆载法,真空预压不产生剪力,规避剪切破坏风险,可一次性施加满负荷。

排水固结法适用于含水量高、压缩性强的天然软土地基,如淤泥、淤泥质土、沼泽等。对于沉降和不均匀沉降要求严格的工程须要慎重选择,因为排水固结法处理软土地基虽有明显效果但排水固结法只能加快固结沉降速率不能减少地基沉降量。

5.4.1 真空—堆载联合预压法

真空—堆载联合预压法是在真空预压施工的基础上,使用砂袋、碎石等重物,在压力的作用下对软土地基进行加固,最终实现加固软土地基的目的。

刘汉龙采用固结理论进行研究真空预压,其过程旨在土体固结过程。实验中预压使土颗粒顺序重组,也伴随着土体结构的局部破坏。真空压力则是把土体中水气排出来,土体内部结构调整,密实度上升。则真空—堆载联合预压法将两者的优点集中在一起,主要表现在:加固效果较好,密实度更高,承载力得到提高;朱建才采用真空—堆载联合预压法对浙江某软土

路基进行加固处理,结果表明了联合超静孔隙水压力小于0,不会引起路基失稳。沉降监测结果显示2-14m深度范围内淤泥土的压缩量约占总沉降量的70%,真空预压的有效影响深度大于10m]。通过大量学者对联合预压法的研究,表明联合预压法比单个实验方法效果要进一步提升,以此节省大量的人力、物力和财力,尤其对环境保护起到了关键性的措施。

6 软土地基处理新方法

近年来随着工程技术的提高,出现一系列新型地基加固技术,如碳化水泥桩固结法、鱼雷状重锤强夯挤密加固法、创新型导电排水固结法、电渗法及微生物加固法。技术发展特点有:(1)由当初传统单一加固方式转变为两种或两种以上地基处理方式;(2)随着新材料的逐渐完善,单一加固材料逐步的被两种或两种以上的加固材料混合取代;(3)传统单一静载加固方式逐渐被淘汰,进而转变为静动力加固方式交替联合方式;(4)局部软弱场地复合地基与非复合地基加固技术的结合。

6.1 电渗法

真空/降水预压对边界施工要求严苛,固结速率受土体透水性制约,效果易受限;堆载预压受材料限制且存在失稳风险,不适用于短工期。电渗固结法可快速提升地基承载力,规避失稳问题,具备良好应用前景。

电渗固结法的基本原理是在土体中插入电极并接通电源,在电场力的作用下,阴离子向阳极移动,阳离子向阴极移动,在移动的过程中并拖拽周围极性水分子运移,从而形成电渗渗流。由于水分子向阴极排出,土体会产生负孔隙水压力,土体在自重应力和负孔隙水压力的联合作用下逐渐固结,土体的强度和地基承载力得到增强。电渗法适用于含水量高、孔隙比大、渗透性低、压缩性高、承载力低的淤泥、软土等,特别适用于流塑状态下土体的固结排水。电渗的加固机理包括两个方面:一方面,由于外加电场土体中的孔隙水被电场拖拽排出土体,使软土地基固结,强度提高;另一方面,由于外加电场土体中不仅会引起电渗、电泳、电迁移等一系列电动现象,同时还会

引起复杂的物理化学反应,如电极的腐蚀、水的电解、离子交换、离子扩散和运移等。

电渗加固技术虽发展但仍处探索阶段,实际推广需深化研究。当前主要问题包括:①电极腐蚀与电能浪费致效率下降,反应生成物污染土体;②土体含水率下降引发裂缝,干扰电场分布,加剧加固不均;③电极腐蚀及电势损耗推高成本,需权衡效益;④合理设计计算方法缺失。

为了加快电渗固结法的工程应用,希望从以下几方面开展探索研究:①土体电渗微观机理研究。②电渗固结现场试验研究。③新型电极材料研究。④纳米材料促进电渗固结试验研究。⑤电渗联合其他工法研究。

6.2 微生物加固

在微生物矿物学方面的研究说明少数天然微生物如产脲酶的微生物,其在适合的人为环境和营养条件下产生的代谢产物即矿物结晶,它可与地基松散土颗粒结合并粘固在一起,从而实现加固土体的目的。微生物成矿技术(MICP)是地基处理领域的新兴研究方向,常用方法包括注射法(主导)、浸泡法、浇灌法。相比传统水泥或化学灌浆,MICP基于嗜碱菌代谢产生脲酶引发化学反应,更环保,是可持续的绿色关键技术。加固后土体的无侧限抗压、抗剪、抗液化强度及抗侵蚀、抗冻性显著提升。钱春香教授研究指出,微生物加固土体效果的关键影响因素包括灌浆工艺、土粒粒径、酶活力、营养液含量、pH值及水温变化,并明确该技术未来研发方向:提升土体均匀度与耐久性,激活原生土体细菌,降低有害代谢风险。

7 结论

总而言之,软土地基是对施工质量和安全运行影响巨大的一个重要因素。软土地基加固方法有许多,要依据施工周围环境来选择适合的方法,方法不同所带来的加固效果、经济效益也有所差异。对软土地基处理的过程中要实事求是、因地制宜,且结合当前科技发展大环境,积极探索用新技术、新工艺、新方法去提高施工质量与效率,力争产生更好经济及社会效益。

参考文献:

- [1] 孙广利,王浩然.浅谈软土地基的加固方法[J].四川建材,2018,44(05):60-61.
- [2] 严涛,董斌.软土地基的加固处理措施研究[J].工程建设,2018(21):61-63.
- [3] 候雅东,陈庚德,陈亮.分析岩土工程地基加固处理方法[J].中国建筑金属结构,2022(02):56-57.
- [4] 程春健,赵李源.岩土工程地基处理的常用方法及应用[J].工程技术研究,2021,6(17):150-151.
- [5] 席聪,陈慧乾,郭玉旭.多样化软弱地基处理施工技术初探[J].山西建筑,2021,47(16):71-73.
- [6] 张祥.土木工程施工中地基加固结构技术的应用[J].绿色环保建材,2021(05):121-122.

- [7] 李晓梅.岩土工程地基加固处理技术分析与研究[J].青海交通科技,2018(03):84-85+126.
- [8] 黄宇西.分析岩土工程地基加固处理方法[J].低碳世界,2019,9(10):136-137.
- [9] 苏德利.浅谈软土地基处理方法选择[J].城市建设理论研究(电子版),2018(17):80.
- [10] 姚艳平.基于地基处理和岩土工程勘察过程中的常见问题及解决方法探讨[J].工程与建设,2021,35(02):327-328.
- [11] 杨华刚.研究岩土工程地基处理的常用方法及应用[J].四川水泥,2021(03):164-165.
- [12] 陈果,张拓.岩土工程地基加固技术探讨[J].散装水泥,2021(01):83-84.
- [13] 马鸣.岩土工程地基处理方法及应用[J].地产,2019(20):168.
- [14] 刘银芳.软基处理措施现状探究[J].中华建设,2019(08):172-173.
- [15] 郭勇.岩土工程地基处理的常用方法及应用探讨[J].建材与装饰,2019(17):233-234.