

路桥施工技术对软土地基处理方法探讨

廖树清

杭州市交通工程集团有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 软土地基作为制约交通基础设施建设的关键地质障碍,其处理效果直接关系到路桥工程的服役性能与全寿命周期成本。传统处理方法虽已形成体系,但在复杂工况下仍面临沉降控制精度不足、工期压力大、环境扰动显著等挑战。本文从工程实施的动态视角出发,系统梳理了软土地基处理技术由“被动应对”向“主动调控”演进的内在逻辑,重点剖析了排水固结类、桩式复合地基类及新兴生态友好型技术的核心机理与适用边界。通过构建“地质-荷载-环境-经济”四维决策模型,并结合典型工程场景(如高填方路堤、桥头过渡段、临水路段)进行针对性分析,提出应摒弃“一刀切”思维,转向基于全过程监测反馈的自适应处理策略。研究表明,未来软基处理的核心竞争力在于多技术协同、智能感知融合与绿色低碳转型,唯有如此,方能在保障工程安全的同时,实现资源节约与生态和谐的双重目标。

关键词: 软土地基; 路桥工程; 地基处理; 复合地基; 沉降控制; 绿色施工; 智能监测

引言

在长三角、珠三角、环渤海等我国经济最活跃的区域,同时也是软土广泛分布的地带,路桥建设正以前所未有的速度推进。然而,这些地区的工程实践反复印证了一个残酷现实:若对软土地基处理不当,再宏伟的桥梁、再宽阔的路面,都可能在通车后不久便陷入“沉降之困”。桥头跳车频发、路面龟裂纵横、甚至局部路基失稳,不仅带来高昂的后期维修费用,更严重损害公众出行体验与政府公信力。这一系列问题的根源,在于软土本身的“先天不足”——高含水、低强度、慢固结。但更深层次的原因,则在于处理方案的选择往往脱离了具体工程语境。例如,在深厚淤泥区采用浅层换填,无异于隔靴搔痒;在工期紧迫的市政快速路项目中强推长达一年的堆载预压,则必然导致项目延期。因此,对软土地基处理技术的探讨,不能仅停留在罗列方法层面,而必须回归工程本源,回答三个核心问题:何时用?用什么?怎么用?本文旨在打破传统技术分类的静态框架,以路桥施工的动态需求为牵引,重新审视各类处理技术的价值定位,并探索一条融合地质适配性、施工可行性、经济合理性与生态可持续性的综合解决路径。

1 软土地基处理的技术谱系与演进逻辑

1.1 第一代:物理置换与压实(被动防御)

早期工程受限于技术与认知,主要采取“以硬换软”的思路。面对表层分布的薄层软弱土,工程师们最直接的做法便是将其全部挖除,代之以砂、碎石或灰土等性能优良的材料,形成所谓的换填垫层。这种方法在软土层厚度不超过两米时效果显著,施工简便且见效迅速,至今仍在小型工程或局部处理中广泛应用。然而,其本质

是一种资源消耗型的被动防御策略,一旦软土层加深,开挖量剧增,不仅成本飙升,还可能因深基坑开挖引发边坡失稳等次生风险。与此同时,强夯和重型碾压也曾被寄予厚望,试图通过巨大的冲击或静压力强行提高土体密实度^[1]。但实践证明,对于孔隙水难以排出的饱和软黏土,这种外力作用非但不能有效压实,反而会因超孔隙水压力积聚而形成强度极低的“橡皮土”,使地基条件进一步恶化。由此可见,第一代技术虽然直观,却难以应对软土复杂的力学行为,其局限性在深厚软基面前暴露无遗。

1.2 第二代:加速固结与应力转移(主动引导)

随着土力学理论特别是太沙基固结理论的成熟,工程师们开始学会尊重并利用软土自身的物理过程,实现了从“对抗”到“引导”的范式转变。最具代表性的便是排水固结法,其核心思想是为软土中的孔隙水开辟高效的“排水通道”。通过在地基中密集插设塑料排水板或袋装砂井,大幅缩短了水的渗流路径,再辅以堆载预压或真空负压作为驱动力,促使孔隙水在较短时间内排出,土骨架的有效应力随之增加,从而完成压缩固结。尤其是真空预压技术的出现,巧妙地利用大气压力作为等效荷载,不仅省去了大量借土和弃土的环节,还从根本上消除了传统堆载可能引发的侧向挤出风险,对周边环境影响极小。与排水固结法并行发展的另一条技术路径是桩式复合地基。它不再执着于改良软土本身,而是另辟蹊径,构筑一个由高强度桩体组成的“地下承重骨架”。无论是通过深层搅拌形成的水泥土桩,还是由碎石、粉煤灰和水泥混合而成的CFG桩,亦或是预制的高强度混凝土管桩,它们都能将上部结构的巨大荷载绕过硬弱的土层,

直接传递至深部稳定的持力层。这种“应力转移”的策略,使得地基的承载能力和沉降控制能力得到了质的飞跃,尤其适用于对变形要求极为严苛的高速铁路和重要桥梁工程。

1.3 第三代:生态协同与智能调控(未来方向)

进入21世纪,随着生态文明建设和“双碳”战略的深入推进,传统的高能耗、高排放地基处理模式正面临严峻挑战。在此背景下,新一代软基处理技术开始强调与自然环境的协同共生。生物固化技术便是其中的前沿探索,它利用特定微生物的新陈代谢活动,在常温常压下诱导生成碳酸钙等胶结物质,将松散的土颗粒自然地“粘合”在一起,整个过程几乎不产生碳排放,展现出巨大的绿色潜力。与此同时,将粉煤灰、钢渣、赤泥等工业固废作为固化剂或路基填料进行资源化利用,不仅降低了工程成本,也有效缓解了固体废弃物的环境压力,实现了经济效益与生态效益的双赢。更为重要的是,信息技术的飞速发展正在重塑地基处理的实施方式^[2]。通过在施工现场布设由沉降仪、孔隙水压力计、测斜仪和分布式光纤组成的智能感知网络,并将数据实时汇入BIM管理平台,工程师可以借助人工智能算法对地基的固结状态进行动态反演和精准预测。这种基于数据的闭环反馈机制,使得施工参数能够根据实际响应进行自适应调整,真正实现了从“经验驱动”到“智能调控”的跨越。

2 基于工程场景的处理策略选择

2.1 场景一:高填方路堤(>6m)

高填方路堤因其巨大的自重,对下卧软土地基构成了严峻考验。其核心矛盾在于,过大的附加应力极易诱发深层圆弧滑动失稳,同时漫长的固结过程将导致不可接受的长期沉降。针对此类工况,塑料排水板联合真空预压法通常被视为首选方案。该组合充分利用了竖向排水体缩短固结时间的优势,以及真空负压加载均匀、无侧限膨胀风险的特点,能够在相对可控的工期内,有效完成大部分主固结沉降,从而将工后沉降控制在规范允许范围内。若项目位于对沉降控制要求极端严格的高速铁路线上,且预算充足,则可考虑采用长短桩复合地基。其中,长桩(如PHC管桩)穿透整个软土层,提供主要的承载力支撑;短桩(如水泥搅拌桩)则用于加固浅层土体,协调长桩与桩间土的变形,形成一个刚柔并济、沉降均匀的整体。尽管此方案造价较高,但其卓越的沉降控制精度使其成为高价值基础设施项目的可靠选择。

2.2 场景二:桥头过渡段

桥头跳车是软土地区路桥工程中最顽固的病害之一,其根源在于桥梁桩基础与柔性路堤之间巨大的刚度差异

所导致的不均匀沉降。解决这一难题的关键,在于实现从“刚”到“柔”的平顺过渡,而非简单地追求路堤部分的绝对零沉降。一个行之有效的策略是构建多层次、多尺度的协同处理体系。在深层,应在桥台后一定影响范围内(通常为20至50米)设置刚性桩基,如CFG桩或预制管桩,人为地将这部分路基的沉降量降至与桥梁基础相当的水平。在浅层,铺设两到三层高强度土工格栅,形成加筋垫层,利用筋材与填料之间的摩擦咬合作用,有效扩散轮载应力,抑制局部差异沉降的发展^[3]。此外,在结构层面,设置钢筋混凝土搭板或采用超轻质的EPS泡沫混凝土作为台背填料,可以从源头上减小附加应力,进一步缓解沉降差。整个处理方案的成功,高度依赖于足够长的过渡段设计,唯有如此,才能确保沉降坡度平缓,消除行车过程中的冲击感。

2.3 场景三:临水、生态敏感路段

当路桥工程穿越湖泊、河流或湿地等生态敏感区域时,传统的地基处理方法往往因产生大量弃土、废水或强振动而受到严格限制。在此类特殊场景下,真空预压法凭借其封闭、静音、无污染的施工特性,成为当之无愧的首选。其施工过程如同在一个巨大的“真空袋”内进行,几乎不对外部水体和土壤造成扰动,完美契合了生态保护的要求。面向未来,就地固化技术为这类工程提供了更具前瞻性的解决方案。该技术通过向原位软土中注入环保型固化剂(如碱激发矿渣浆液),在不进行大规模土方开挖和运输的前提下,直接在原地将软弱土体转化为具有一定强度的固化体。这种“零废弃、低介入”的施工模式,最大限度地减少了对自然生态系统的干扰,代表着绿色基建的发展方向。

3 构建科学的决策支持体系

为避免处理方案选择的盲目性与随意性,有必要建立一个系统化的决策框架。本文提出一个“地质-荷载-环境-经济”(GL-E-C)四维决策模型。地质维度(G)是基础,它要求我们全面掌握软土的厚度、成因、物理力学参数(如不排水抗剪强度、孔隙比、固结系数)以及下卧持力层的埋深与性质。荷载维度(L)是目标导向,不同的上部结构形式(如普通公路、高速公路、高速铁路)对地基的承载力和沉降控制有着截然不同的要求。环境维度(E)是约束条件,在城市建成区、水源保护区或邻近既有重要设施的区域,施工方法必须满足严格的噪音、振动和废弃物排放标准。经济维度(C)则是现实考量,不仅要评估直接的工程造价,还需纳入征地拆迁、交通疏解、后期维护等间接成本,乃至全寿命周期的综合效益。理想的处理方案,正是在这四个维度构成的复杂空间中寻

找到的那个最优平衡点。例如，在寸土寸金的城市核心区，即使真空预压的初期投入略高，但其低扰动、短工期的优势所带来的社会综合效益，往往远超成本差异；而在偏远开阔的乡村地区，则完全可以优先选用成本更低的堆载预压方案。

4 工程实践中的关键控制要点

再精妙的设计方案，若缺乏严谨的施工过程控制，也难以转化为可靠的工程实体。全过程、全方位的监测是贯穿软基处理始终的生命线。从施工伊始，就必须布设完善的监测网络，对关键指标如地表沉降、深层水平位移、孔隙水压力等进行高频次、自动化采集。这些宝贵的数据不仅是判断地基固结进度、验证设计假定的直接依据，更是指导后续施工（如决定何时卸载、是否需要补强）的核心决策支撑。与此同时，施工质量的精细化控制同样不容忽视。对于桩基类工程，水泥的掺入量、水灰比、搅拌的均匀性和连续性，以及最终成桩的长度与直径，都必须严格遵循设计要求，任何细微的偏差都可能在后期放大为严重的工程隐患。对于预压类工程，则要确保密封膜的焊接质量和覆盖完整性，以及砂垫层和竖向排水体的畅通无阻^[4]。展望未来，信息化施工将成为行业标配。通过将现场监测数据实时接入集成化的项目管理信息平台，并结合先进的数值反演与人工智能预测模型，可以实现对地基变形趋势的动态推演，进而对施工参数进行自适应优化，真正形成“感知-分析-决策-执行”的智能闭环，将软基处理从一门经验艺术，升华为一门精准科学。

5 结语

软土地基处理绝非简单的技术堆砌，而是一项融合了地质认知、力学原理、施工艺术与经济智慧的系统工程。本文通过对技术演进脉络的梳理和典型场景的剖析，得出以下结论：（1）理念升级是前提。必须从“被动防御”转向“主动引导”，最终迈向“生态协同与智能调控”。（2）场景适配是核心。不存在放之四海而皆准的“最佳”方法，只有“最合适”的组合方案。高填方、桥头段、临水区等不同场景，需匹配差异化的技术策略。（3）决策科学化是保障。应建立并应用GL-E-C四维决策模型，使方案选择从经验主义走向理性分析。（4）过程精细化是关键。依托全过程、全方位的智能监测与信息化施工，确保设计意图在施工现场得到精准实现。展望未来，随着人工智能、新材料和绿色化学的深度交叉融合，软土地基处理技术将迎来新一轮革命。我们有理由相信，未来的路桥工程不仅能安然屹立于“豆腐”之上，更能成为人与自然和谐共生的典范。

参考文献

- [1]肖静宇,龙杰.路桥施工技术对软土地基的处理分析[J].汽车周刊,2025,(11):107-109.
- [2]曹越欣.路桥施工技术处理软土地基的方法研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(12):154-156.
- [3]周宋记.路桥施工技术对软土地基的处理分析[J].运输经理世界,2023,(08):99-101.
- [4]陈保方.路桥施工技术对软土地基处理方法探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(05):59-61.