软基处理技术在交通工程项目中的实践探讨

李　政　李乐峰
山东交工建设集团有限公司　山东　日照　276500

摘　要：软土地基在交通工程中频繁遭遇，高压缩性、低强度与欠固结特性直接威胁路基稳定及路面长期性能。本文先剖析软土基本物理力学指标及由此诱发的典型破坏形态，继而梳理排水固结、换填垫层、复合地基与夯实挤密四类工艺的适用情境及利弊。从地层参数、结构样式和施工条件三方面比对各方案的契合程度。针对现场常发的排水阻滞、桩身缺陷及过大施工扰动，依托工艺参数微调、装置改良和动态监测反馈提出应对举措，力求为后续项目供给实操参照。

关键词：软基处理；排水固结；复合地基；施工优化；交通工程

引言：软土强度低、流变性强，上部荷载作用下沉降过量或失稳风险突出，这类地基在我国交通基建中分布极广，处理稍有不妥便影响工程安全和长期运营。不同软基加固工法各有适用前提，选型偏差不仅加固效果落空，反而催生新的质量隐患。施工阶段机械配套、工序搭接、现场管理水平波动大，直接左右最终处置成效。基于对软土工程特性的把握，对比常用处理技术的边界条件，再结合施工环节常见故障点，探讨可行的调控策略，对同类项目建设有切实的参考价值。

1 交通工程软基基本特性与施工影响分析

1.1 软土基本物理力学特性

软土多近饱和，天然含水率偏高，孔隙比大，土体结构松散。压缩性高，上部荷载作用下沉降明显，且沉降延续时间久，既包括瞬时发生的弹性变形，也包括随时间发展的固结变形；抗剪强度不足，排水固结系数小，超静孔压消散慢，灵敏度偏高，一旦受到外部扰动，强度便迅速下降。这些工程特性致使软土在外荷载下变形量大、稳定性差。前期固结压力和当前有效应力水平对软土变形与强度影响深刻，交通工程基础设计参数取值必须充分考虑这些因素，才能为后续建设提供合理依据。

1.2 交通工程软基常见病害类型

交通工程软基施工阶段与后续运营期间，不均匀沉降问题频繁出现，路面或场坪表面的平整度因此显著下降，直接损害行车的舒适性和使用品质。侧向变形所导致的滑移或隆起同样屡见不鲜，此类位移对路基整体稳定构成严重威胁。在动力荷载循环作用之下，软基累积性下沉逐步加深，结构物差异变形随之持续扩大[1]。地基土强度在长期服役过程中衰减，承载力明显不足，难以满足设计要求；排水系统不畅时，翻浆冒泥等水毁灾害便极易发生。各类病害种类繁多，彼此间存在内在联系，对工程安全和运营性能形成综合性的不利影响。

1.3 软基缺陷对交通工程施工及运营的影响

施工期软基承载力不足，施工机械正常作业受到严重制约，填筑速率被迫降低，压实质量难以保证。地基失稳变形极易引发已完结构位移或开裂，工序之间衔接顺畅度随之下降。运营期持续沉降不断劣化路面使用性能，养护工作量显著增多，维护频率相应提高。过大的差异沉降严重降低行车舒适性，导致通行能力受损。若软基缺陷长期得不到妥善处置，附属设施老化进程将明显加快，交通系统可靠性与耐久性持续受到负面影响。

2 交通工程常用软基处理技术

2.1 排水固结类处理技术

排水固结技术就是给软土一个预压的过程，通过设置竖向排水体让土里的水尽快流出来，孔隙水压力降下去之后有效应力就上来了，土体强度自然跟着提高。预压荷载可以采用堆土或抽真空的方式实现，排水体通常选用塑料排水板或袋装砂井，布设间距和深度需根据土层固结系数来确定[2]。实际操作中加荷速率要控制得当，过快容易把地基压坏，过慢工期又拖太长，这个平衡点需要现场监测数据来指导调整。2025 年深圳机场 T4 航站区软基处理工程用地面积约 420 万平方米，建设内容涵盖堆载预压排水固结和真空预压排水固结两大类工艺，工程团队面对原始地貌复杂、地层结构多样等挑战，灵活运用预压地基等多项工艺，显著提升了地基整体稳定性。该类方法对饱和黏性土特别对症，能较好地

解决工后沉降偏大的问题。

2.2 换填垫层类处理技术

换填垫层处理起来比较直接，把浅层那部分强度不够的软土整个挖走，然后回填上砂砾、碎石或矿渣这些粗颗粒材料，每铺一层就压实一层。垫层本身的压缩性很低，承载力明显优于原状软土，而且粗粒料透水性好，能起到水平排水的作用，有助于下部残留软土继续固结。换填深度一般控制在 2 到 3 米以内经济上比较划算，再深的话挖方量和回填量都太大，垫层厚度太薄又起不到扩散荷载的效果，需要结合上部荷载和软土厚度综合判断。2025 年 104 国道新昌段改建工程针对盖板涵洞软土地基处理问题，采用砂石料分层夯实换填处理方案，现场实施效果显示换填法可较好地处理涵洞软土地基，有效控制基础沉降。这种方法适合浅层软基且地下水位不太高的场地。

2.3 复合地基加固类处理技术

复合地基的做法是在软土里打设一系列竖向增强体，让这些硬化的桩体和桩间土协同工作，共同承担来自上部的荷载。增强体可选用水泥搅拌桩、高压旋喷桩或是素混凝土桩，桩体刚度不同其荷载传递机理也有差异，桩长和桩间距根据设计承载力和沉降限值来确定。在荷载传递过程中，桩体承担了大部分应力，桩间土的应力水平随之降低，同时桩体对周围土还有侧向约束作用，能有效阻止土体侧向挤出。2025 年晋江国际鞋纺城片区道路工程针对场地表层杂填土及下伏淤泥等软弱土层，深层软基路段采用水泥搅拌桩处理方案，采用湿法双轴施工、呈正三角形布置，桩顶设置砂砾垫层及双向钢塑土工格栅，检测结果显示单桩承载力和复合地基承载力均达到设计要求[3]。

2.4 夯实挤密类处理技术

夯实挤密技术依靠重锤下落或者振动设备产生的强大能量作用在地基表面，让土颗粒重新排列靠拢，把孔隙挤小，土体密度和强度自然就提上去了。强夯法是最常见的做法，对砂性土和含水量不太高的粉质黏土效果比较理想，但碰到饱和软黏土就不太灵了，直接夯容易产生橡皮土现象，通常需要先采取降水措施再做。挤密法则是通过成孔把周围土体向侧向挤压，再往孔里填砂石并夯实，填料本身也被夯实成密实的桩体。2025 年牙买加蒙特哥贝绕城路项目沿海软基段开展强夯置换试验，该段地处滨海相沉积平原沼泽区，地基土为高压缩性流塑状淤泥，项目部决定采用强夯置换法进行处理，施工中重点把控夯击能量、布点间距等关键参数，试夯结束后沉降量、夯坑深度及压实效果均符合预期。这类技术施工速度快，但振动和噪声比较大，周边环境敏感时要注意控制施工参数。

3 软基处理技术在交通工程中的适用条件分析

3.1 基于软基土层参数的技术适配性

软基处理技术的选用首先得看土层自身的条件，不同土层的含水率、厚度、渗透性和强度参数直接决定了哪些方法能派上用场。含水率偏高且渗透性较差的饱和黏土层，排水固结类技术能够发挥较好的效果，因为这类土层需要较长时间完成固结排水过程。换填垫层类技术则更适用于浅层软土厚度不大的情况，一般不超过 3 米的软弱夹层采用换填处理比较实在。对于深层厚软土，复合地基加固类技术能够通过增强体穿越软土层将荷载传递至下部较好持力层，适应性明显优于浅层处理方法。夯实挤密类技术对土体含水率有一定要求，含水率过高的软土受冲击时容易产生反弹现象，效果会大打折扣。

3.2 基于交通工程结构类型的技术适配性

交通工程中，路基、桥梁、隧道等结构形式对地基性能的诉求各有侧重，技术方案的选取必须紧扣结构自身的工作特点。路基对工后沉降与差异沉降的限制极为苛刻，排水固结类措施能在填筑进程中同步削减总沉降及工后沉降，施工配合也较为顺手。桥梁结构对桥头段的差异沉降反应敏锐，复合地基加固手段凭借整体刚度充足、沉降量微小且分布均匀的长处，在过渡段处理中占据明显优势[4]。隧道或涵洞周边的地基作业空间通常狭窄，夯实挤密类工艺的设备占地小、移动方便，在受限环境下更易展开操作。路面结构层对地基承载力的要求相对平缓，换填垫层类方法足以应对常规交通荷载下的使用需要。各项技术各有所属，选用时须立足实际条件，兼顾安全与经济。

3.3 基于施工工况的技术适配性

施工工期、场地条件、地下水状况及周边环境，这些现实因素对技术选型的影响不亚于结构本身的要求。工期极为紧张时，排水固结类方法由于预压期固定、难以压缩，基本失去竞争力。地下水位偏高之处，换填垫层法不得不增设降水环节，否则基坑边坡稳定和垫层压实质量都无从保证。场地开阔且周围无敏感建筑物，夯实挤密法可以快速推进，但振动和噪声若波及居民区或精密仪器房，则必须重新评估。复合地基加固法适应性较强，然而搅拌桩成桩质量受天气波动影响明显，雨季施工时强度上升缓慢，有时甚至需要停工待晴。施工

机械的进出场条件也不可小觑，通道狭窄或转弯半径不足，大型设备便无法就位，只能选择体积较小的机具。

4 交通工程软基处理施工常见问题与优化思路

4.1 各类处理技术施工中的常见技术问题

软基处理方法多样，不同工法在实施中各有典型技术难题。水泥粉煤灰砾石桩施工中，混合料泵送堵管、饱和土层窜孔及桩身完整性缺陷等问题较为突出。真空预压法面临密封系统漏气、膜下真空度难以维持的技术瓶颈，尤其在深厚流塑状软土区域，土体渗透性极差导致固结速率缓慢。深层搅拌桩受限于传统施工装备，大直径长桩在深厚软土中普遍存在搅拌不均匀、桩身强度不连续的问题，同时伴有糊钻抱钻、地表冒浆等工艺缺陷。强夯法处理软基时，由于软土渗透性差，夯击产生的超静孔隙水压力难以在短时间内消散，影响加固深度与处理效果，且易出现橡皮土现象。换填法施工中常遇到软弱土层开挖后的边坡稳定性控制难题，以及换填材料与原地基接触界面的处理难点。高压旋喷桩施工则面临桩位偏差控制、垂直度保证及泥浆用量稳定性等问题。

4.2 施工工艺优化方向

施工工艺优化，重心在于关键工序的精细管控和智能化升级。搅拌桩施工中引入多层互剪搅拌桩技术，借助创新钻具结构与测控系统，传统搅拌桩均匀性差、强度不足的缺陷得以克服，均匀性和强度均得到改善。智能监控系统全程把控钻进速度和喷浆量，作业方式由四搅两喷改为两搅一喷，工期随之压缩，效率提升明显。真空预压工艺采用增压式真空联合堆载预压技术，十二道工序逐一严格管控，加固效果可靠，质量保障性强[5]。强夯施工可结合降水强夯工艺，将井点降水与强夯作业融合，井点的大排气量和大真空度有利于超静孔隙水压力的消散，处理深度达到6米，适合深层加固。桥头软基处理方案选用泡沫轻质土联合桩基，轻质特性降低地基附加应力，桥台近区沉降分布更均匀，行车舒适性提高。固废基绿色凝胶材料能实现软土就地固化，固化后土体强度高、渗透性低，既节约材料又减少外运。

4.3 施工资源配置优化思路

施工资源优化涉及设备、材料与人员三方面，须同步推进。数字化管理平台接入物联网终端，隐蔽工程从钻孔到验收全程数据留痕，可视化管控落到实处。软基智控平台覆盖软基处理、路基填筑和沉降监测三个应用场景，数据采集频次与处理效率较传统方式有大幅跃升。北斗高精度定位系统为桩机提供厘米级引导，漏桩和偏位问题基本消除。材料选用上，固废基固化剂把工业副产物转化为路基稳定材料，水泥用量减少明显，碳排量同步下降；高效解泥造浆装备固定产能每小时400立方米，物料转化率提高，浪费减少。人员组织随施工节奏灵活调整，高峰期增派作业班组，低峰期精简人手，避免窝工。废弃土方经固化处置后可变为流态固化土或轻质固化土，废料重新进入施工循环，体现绿色理念。物联网调度平台统一调配各类资源，工期压缩与人工成本控制均有良好效果。

结束语：软基基本物理力学特性直接控制交通工程中常见病害的发生类型，这些病害对施工进程和运营状态均产生干扰。四类主流处理技术在基本原理、适用土层和结构匹配度上各有长短，施工条件限制也不尽相同，现场选择需要根据具体工况综合权衡。工艺优化和合理调配施工资源是提升软基处理效果的关键环节，设备改造、施工参数精细调整及信息化管理手段的引入，为解决施工过程中出现的各类难点提供了有效支撑。持续积累工程经验，逐步完善技术措施，软基处理的质量控制水平可得到稳步提升。

参考文献

[1] 仲恩燕. 工程施工中的软土地基用纳米材料加固处理技术探究 [J]. 粘接,2026,53(2):541-544.

[2] 陈浩斌. 软土地基处理新技术及工程实践 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(3):092-095.

[3] 林铨. 水泥搅拌桩在道路软基处理中的应用 [J]. 大众标准化,2025,(23):146-148.

[4] 张艺援. 软土地基处理新技术的工程应用研究 [J]. 江西建材,2026,(4):244-246.

[5] 崔轩铭. 软基加固技术在市政工程施工中的应用研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2026,(8):173-175.