

公路桥梁施工中软土地基施工技术剖析

李云

云南航安工程检测有限公司 云南 昆明 650501

摘要:随着我国交通基础设施建设的不断推进,公路桥梁工程日益向地质条件复杂的区域延伸,其中软土地基作为一类典型的不良地质条件,对桥梁结构的安全性、稳定性和耐久性构成重大挑战。本文围绕公路桥梁施工中软土地基处理的关键技术展开系统剖析,首先阐述软土地基的基本特性及其对桥梁工程的危害,继而分类介绍当前主流的软基处理方法,包括换填法、预压法、桩基础、复合地基及新型加固技术等,并结合典型工程案例进行效果评估。最后,针对施工过程中存在的常见问题提出优化建议与质量控制措施,旨在为类似工程提供理论支撑与实践指导。

关键词:公路桥梁;软土地基;地基处理;施工技术;沉降控制;稳定性

引言

近年来,我国高速公路网持续扩展,跨江跨海桥梁、山区高架桥及平原低洼地带桥梁建设数量显著增加。在这些工程中,不可避免地会遇到软土地基问题。软土通常指天然含水量高、孔隙比大、压缩性强、承载力低且具有显著流变特性的黏性土,如淤泥、淤泥质土、泥炭土等。此类地基若未经有效处理,在桥梁荷载作用下极易产生过大沉降、不均匀沉降甚至失稳破坏,严重威胁桥梁结构安全和运营寿命。因此,科学合理的选择并实施软土地基处理技术,是保障公路桥梁工程质量的核心环节。本文将从软土特性出发,系统梳理现有软基处理技术体系,分析其适用条件、施工要点及优缺点,并通过工程实例验证其有效性,以期能为工程技术人员提供全面、实用的技术参考。

1 软土地基的基本特性与工程危害

1.1 软土的物理力学特性

软土主要分布于沿海地区、河谷平原、湖泊沼泽及古河道沉积区,其典型特征表现为高含水量、高压缩性、低抗剪强度、低渗透性以及显著的流变性和结构性。天然含水量常超过液限,可达40%至80%甚至更高,导致土体处于饱和或近饱和状态。在荷载作用下,软土表现出极高的压缩性,压缩系数 a_{1-2} 通常大于 0.5MPa^{-1} ,部分区域甚至超过 2.0MPa^{-1} 。与此同时,其不排水抗剪强度普遍低于 20kPa ,有些区域甚至不足 10kPa ,难以承担桥梁结构传递的竖向与水平荷载。此外,软土的渗透系数多在 10^{-7} 至 10^{-9}cm/s 量级,固结排水过程极为缓慢,使得沉降发展周期长。更值得注意的是,软土具有明显的结构性,一旦在施工过程中受到扰动,其天然结构遭到破坏,强度将迅速衰减,进一步加剧工程风险。

1.2 对公路桥梁工程的危害

软土地基对桥梁工程的主要危害体现在以下几个方面:(1)过大沉降:在桥梁自重及车辆荷载作用下,软土层压缩导致桥台、桥墩产生显著沉降,影响桥面线形和平顺性。(2)不均匀沉降:由于软土层厚度、性质在横向或纵向分布不均,易造成相邻桥墩沉降差异,引发梁体开裂、支座脱空等问题。(3)侧向位移与失稳:高填方桥台或斜坡地段,软土在附加应力作用下可能发生侧向挤出,导致桥台倾斜、桩基偏位甚至整体失稳。(4)工后沉降难以控制:软土固结周期长,部分工程在通车后仍持续沉降,影响运营安全与舒适性。(5)施工期稳定性风险:在桥梁基础施工阶段,若未采取有效支护或排水措施,可能引发基坑坍塌、边坡滑移等安全事故。因此,必须在设计与施工阶段对软土地基进行系统处理,确保桥梁结构的长期安全与功能完整性。

2 软土地基处理技术体系

2.1 换填法(浅层处理)

换填法是一种适用于软土层较薄(一般不超过3米)情况下的浅层地基处理技术。其基本原理是将表层软弱土体全部或部分挖除,替换为强度较高、压缩性较低且具有良好的压实性能的材料,如砂、碎石、灰土或级配良好的土石混合料,并通过分层回填与压实形成具有一定承载能力的人工地基垫层。该方法施工工艺简单,无需复杂设备,工期短且成本相对较低,特别适用于城市郊区或地形开阔的桥梁引道区域^[1]。然而,换填法的局限性也较为明显,仅能处理浅层软土,对于深厚软基无能为力;同时,大量挖方与弃土不仅增加运输成本,还可能对周边环境造成扰动。为确保处理效果,施工过程中需严格控制回填材料的级配、每层填筑厚度(通常不超过30厘米)以及压实度(一般要求不低于93%),避免因压实不足导致后期沉降。

2.2 预压法（排水固结法）

预压法是通过施加外部荷载促使软土排水固结，从而提高其强度与模量、减少工后沉降的有效手段，广泛应用于软土层厚度在3至20米之间的桥梁工程中。根据加载方式的不同，可分为堆载预压法与真空预压法。堆载预压法是在地表铺设砂垫层后，堆填土石等临时荷载，利用超载加速软土中孔隙水的排出，实现固结。为缩短排水路径、加快固结速率，常配合设置竖向排水体，如塑料排水板或砂井。该方法技术成熟、效果可靠，但需大量堆载材料，占用施工场地，且固结周期较长，通常需6至18个月，对工期紧张的项目构成挑战。相比之下，真空预压法则通过在地表铺设密封膜并利用真空泵抽气，在土体内部形成负压环境，等效于施加约80kPa的均布荷载。该方法无需堆载，施工安全，对邻近既有结构扰动小，且环保效益显著。但其对密封系统的完整性要求极高，一旦膜下漏气，将严重影响加固效果；同时，真空压力随深度衰减较快，对深层软土的加固能力有限。因此，在实际应用中，常采用真空联合堆载预压的方式，兼顾效率与深度。

2.3 桩基础技术

当软土层深厚或桥梁上部结构荷载较大时，采用桩基础将荷载有效传递至深层稳定持力层成为必然选择。钻孔灌注桩因其适应性强、承载力高、成桩质量可控，被广泛应用于各类地质条件下的桥梁工程。施工中需特别注意泥浆护壁的稳定性和孔底沉渣的清除以及水下混凝土的连续浇筑，以确保桩身完整性与承载性能。预应力高强度混凝土管桩（PHC管桩）则凭借工厂预制、现场静压或锤击沉桩的优势，实现快速施工与质量稳定，尤其适用于工期紧迫的项目。但其穿越硬夹层能力有限，且沉桩过程中的振动可能扰动周边软土，引发邻近结构沉降^[2]。钢管桩则多用于高承载力需求或海洋腐蚀环境，其抗弯性能优异，但造价较高，且需进行严格的防腐处理。无论采用何种桩型，设计阶段均需综合考虑桩长、桩径、桩距的合理性，并充分评估负摩阻力对桩基承载力的不利影响，进行单桩与群桩的承载力验算，确保结构安全。

2.4 复合地基技术

复合地基技术通过在软土中设置增强体，使其与原状土共同承担上部荷载，形成“桩-土”协同工作的复合受力体系，兼具经济性与有效性。水泥搅拌桩是其中应用最广的形式之一，通过深层搅拌机械将水泥浆或干粉与软土强制混合，形成具有一定强度的圆柱状桩体。该方法无振动、无泥浆排放，对环境友好，适用于含水量

适中的黏性土层。然而，对于高含水量淤泥或富含有机质的软土，固化反应受限，桩体强度难以保证。碎石桩则通过振动或冲击成孔后填入碎石并密实，既起到加筋作用，又形成竖向排水通道，适用于可液化砂土或夹有砂层的软土地基，但在纯淤泥中易发生“鼓胀”或“缩颈”，效果不佳。高压旋喷桩利用高压喷射流切割土体并注入水泥浆，形成直径较大的固结体，常用于局部加固、桥台抗滑或止水帷幕等特殊部位^[3]。各类复合地基的设计关键在于合理确定桩土应力分担比、桩间距及置换率，确保整体稳定性与沉降控制目标的实现。

2.5 新型与辅助技术

随着工程技术的发展，一系列新型与辅助技术在软基处理中发挥着越来越重要的作用。土工合成材料的应用尤为突出，其中土工格栅或格室可用于路堤加筋，通过限制土体侧向变形提高整体稳定性；土工布则发挥反滤排水功能，防止细颗粒流失堵塞排水通道；土工膜则在真空预压中作为密封层，保障负压环境的形成。在空间受限或既有桥梁加固场景下，微型桩与树根桩因其直径小（通常100~300毫米）、可斜向布置、施工扰动小等优点，逐渐受到青睐，能够灵活形成“树根状”支撑网络，有效提升局部承载力。此外，智能监测与信息化施工理念的引入，标志着软基处理进入精细化管理时代。通过布设沉降板、孔隙水压力计、测斜仪等传感器，实时采集地基变形、孔压消散及侧向位移数据，并结合数值模拟进行动态反馈，可实现施工参数的及时调整，真正做到“监测指导施工、数据驱动决策”，显著提升工程的安全性与可靠性。

3 典型工程案例分析

3.1 案例一：长三角某高速公路跨河大桥软基处理

该工程位于长江三角洲冲积平原，桥址区表层覆盖3至5米厚的淤泥质黏土，其下为10至15米厚的软黏土层，地下水位埋深较浅，地质条件极为不利。针对桥台区域沉降敏感的特点，设计采用了 $\Phi 500$ 毫米水泥搅拌桩复合地基方案，桩长12米，桩距1.2米，呈正方形布置，以有效控制差异沉降；桥墩则采用钻孔灌注桩，桩径1.5米，桩长45米，穿透软土层嵌入中风化砂岩持力层，确保高承载力与长期稳定性；引道路堤段则结合两层双向土工格栅加筋与6个月的堆载预压，形成“加筋+排水固结”的双重保障。工程实施后，监测数据显示工后沉降控制在30毫米以内，桥台与路堤衔接平顺，未出现跳车现象，复合地基承载力实测值达180kPa，完全满足设计要求，验证了该综合处理方案的有效性。

3.2 案例二：珠三角某跨海大桥引桥软基处理

该引桥工程地处滨海地带,软土具有高含盐量、高有机质含量的特点,传统水泥搅拌桩因固化反应受阻而效果不佳。为此,项目创新采用真空联合堆载预压技术,即在铺设30厘米砂垫层与土工布的基础上,插设SPB-C型塑料排水板(间距1.0米),再覆盖密封膜并施加80kPa真空压力,同时辅以50kPa的堆载,形成双重荷载效应。施工全过程同步布设自动化监测系统,实时反馈固结状态。实践表明,该方案不仅使地基固结度达到90%以上,还将工期缩短约30%;地表沉降速率在稳定后小于2毫米/月,远优于规范限值;同时,由于减少了大量土方运输与堆载,工程成本降低15%,生态扰动显著减小,体现了绿色施工与高效加固的统一。

4 施工常见问题与优化建议

4.1 常见问题

首先是勘察精度不足,部分项目因钻探深度不够、取样扰动严重或室内试验代表性差,导致地质模型失真,设计方案与实际地层脱节,处理措施失效。其次是施工过程中质量控制不严,例如水泥搅拌桩施工中水泥掺量不足、桩长未达设计深度,或预压施工中堆载高度未达标、加载速率过快,均会削弱处理效果。第三,监测体系缺失或流于形式,无法及时捕捉异常沉降、孔压积聚或侧向位移等预警信号,错失干预时机。第四,工后沉降预测过于简化,仅依赖主固结理论,忽视软土的次固结与流变特性,导致运营期沉降超出预期,影响桥梁正常使用。最后,部分施工单位环保意识薄弱,堆载取土破坏植被,泥浆随意排放污染水体,违背可持续发展理念。

4.2 优化建议

为应对上述问题,应从全生命周期角度优化软基处理策略。首先,必须加强前期地质勘察工作,综合运用静力触探(CPT)、十字板剪切试验、高密度电法等原位测试手段,结合室内三轴、固结等力学试验,构建精细化三维地质模型,为设计提供可靠依据。其次,大力推行信息化施工,建立基于BIM与GIS的集成管理平台,将

地质信息、设计模型、施工进度与实时监测数据深度融合,实现“监测-分析-反馈-优化”的闭环管理^[4]。第三,强化关键工序的过程监管,对桩基成孔、混凝土浇筑、预压加载等环节实行监理旁站制度,确保施工参数严格按图执行。第四,在设计阶段引入考虑时间效应的沉降预测模型,如结合Terzaghi一维固结理论与Merchant流变模型,合理预留沉降量,并在结构构造上采取适应性措施。最后,积极推广绿色施工技术,优先选用真空预压、就地固化、再生材料回填等低扰动、低排放工艺,最大限度减少对生态环境的影响,推动公路桥梁建设向高质量、可持续方向发展。

5 结语

软土地基是公路桥梁工程建设中不可避免的技术难题。本文系统剖析了软土的工程特性及其对桥梁结构的危害,全面梳理了换填法、预压法、桩基础、复合地基及新型辅助技术等主流处理方法,并结合工程实例验证了其适用性与有效性。研究表明,单一技术往往难以满足复杂工程需求,应根据地质条件、荷载特征、工期与经济性等因素,采用“多技术协同、全过程控制”的综合处理策略。未来,随着智能传感、数值模拟与绿色建材的发展,软基处理将朝着更高效、更精准、更可持续的方向演进。工程实践中,唯有坚持“地质先行、设计优化、施工精细、监测闭环”的原则,方能确保公路桥梁在软土地基上的百年安全。

参考文献

- [1]商文祥.道路桥梁施工中软土地基处理技术的应用[J].汽车周刊,2026,(01):124-126.
- [2]周若星.高速公路桥梁施工中的地基处理技术[J].时代汽车,2025,(24):153-155.
- [3]赵玉玺.道路与桥梁施工中软土地基施工技术应用实践研究[J].科技资讯,2025,23(19):164-166.
- [4]向春.桥梁施工中软土地基处理技术的应用[J].交通世界,2025,(24):142-144.