

沉管隧道施工技术与地基处理优化

文 / 王为民 上海海科工程咨询有限公司

摘要: 沉管隧道施工技术在现代交通工程领域中占据着极为重要的地位,随着城市化进程的加速和水域交通的日益繁忙,沉管隧道以其独特的优势,如对航道影响小、施工速度相对较快等,成为跨越江河湖海的理想选择。然而,沉管隧道的施工面临诸多挑战,其中地基处理尤为关键。地基的稳定性直接关系到沉管隧道的安全与使用寿命,因此深入研究沉管隧道施工技术与地基处理优化具有重要的现实意义。

关键词: 沉管隧道; 施工技术; 地基处理优化

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.020

引言

在当今的基础设施建设中,沉管隧道作为一种特殊的地下工程结构,不断在世界各地的大型工程中得到应用。从技术层面看,沉管隧道施工融合了水下工程、结构工程等多学科知识。同时,地基处理是沉管隧道施工的核心环节之一。由于沉管隧道位于水下,地基的地质条件复杂多变,如何确保地基能够承受沉管的重量并维持长期稳定,是工程师们必须攻克的难题,这也促使对沉管隧道施工技术与地基处理优化展开探讨。

一、沉管隧道的分类

沉管隧道根据不同的分类标准可以分为多种类型,按管节材料分类,可分为钢壳混凝土管节沉管隧道和钢筋混凝土管节沉管隧道。钢壳混凝土管节沉管隧道的管节外壳为钢壳,内部填充混凝土。这种管节的优点在于钢壳可以在浮运过程中提供较好的水密性和结构强度,例如美国的海湾地区一些沉管隧道采用了这种类型的管节。而钢筋混凝土管节沉管隧道则以钢筋混凝土为主要材料,其耐久性较好,成本相对较低。像中国的港珠澳大桥沉管隧道就采用了大型的钢筋混凝土管节。按沉放方式分类,有吊沉法沉管隧道和拉沉法沉管隧道等。吊沉法是利用起重设备将管节吊起,然后缓慢下沉到预定位置。在这个过程中,需要精确控制管节的姿态和下沉速度,以确保与已沉放管节的准确对接。拉沉法是通过岸上或水上的牵引设备将管节拉到指定地点进行沉放,这种方法对于一些特定的施工环境,如狭窄水域或靠近岸边的区域较为适用。按断面形状分类,可分为圆形沉管隧道、矩形沉管隧道等。圆形沉管隧道在承受外部压力时具有较好的力学性能,常用于一些对结构受力要求较高的情况。矩形沉管隧道则在空间利用上更具优势,能够更好地满足隧道内部的功能布局需求,如车道布置等。不同类型的沉管隧道各有其特点和适用范围,在实际的工程建设中需要根据具体的工程需求、地质条件、水文环境等因素综合选择。

二、地基处理在沉管隧道施工中的重要性

地基处理在沉管隧道施工中的重要性不容忽视,它不仅决定了沉管隧道的结构安全,还影响着隧道的长期

使用效果和寿命。若地基承载力不足,沉管隧道管节在巨大重量和上部荷载作用下可能产生过度沉降,严重危及隧道安全。特别是在软土地基区域,地基处理的重要性更为凸显。通过有效的地基处理,可以控制不均匀沉降,防止管节连接部位出现错台、变形,避免止水结构受损和隧道渗漏等问题。我公司正是深谙此道,成功完成了深中通道32管节沉管项目,该项目已顺利通车。该项目采用双向8车道设计,管节为钢壳砼结构,施工难度极大。在地基处理过程中,使用了地基整平一体船进行作业,该船机设备集成了多项先进技术,能够高效、精准地完成地基整平工作,为后续沉管安装提供了坚实保障。通过这一项目,充分展示了在地基处理领域的专业能力和技术创新。

三、复杂地质条件下地基处理的挑战

在复杂地质条件下,地基处理面临诸多严峻挑战。从岩土特性方面来看,在软土地层中,土的强度低、压缩性高,这使得地基难以承受沉管隧道巨大的重量,容易产生较大沉降。例如在滨海地区的淤泥质软土,其含水量高,处理时需要耗费大量资源来提高地基承载能力和减少沉降量。而在岩石地层,如果存在岩溶、裂隙发育等情况,地基的稳定性难以保证。岩溶地区可能存在溶洞,会导致地基局部失稳,在地基处理时需要准确探测溶洞位置并进行填充加固等复杂操作。从地下水的影响来说,在地下水位较高的区域,地下水的渗流可能会冲刷地基处理材料,影响处理效果。而且高水位可能造成管涌、流沙等不良地质现象,增加地基处理的难度。例如在一些靠近河流的地段,地下水与地表水联系紧密,处理地基时要考虑水压力对加固结构的影响。此外,复杂地质条件往往是多种不利因素的组合,不同地层的交错分布、地质构造的复杂性等,都要求地基处理技术必须具备很强的适应性和综合性,这无疑给地基处理带来了巨大的挑战。

四、地基处理技术要点

(一) 深层搅拌法

深层搅拌法是地基处理中一种重要的技术手段,其原理是通过特制的深层搅拌机械,在地基深处将软土和

固化剂（如水泥浆）强制搅拌，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的加固土桩体，从而提高地基的承载能力。在施工流程方面，要进行场地平整，确保桩机能够稳定作业。然后确定搅拌桩的位置和设计深度等参数。桩机就位后，启动搅拌轴，使其下沉至设计深度，在下沉过程中，通过灰浆泵将水泥浆等固化剂压入地基土中，边下沉边搅拌。到达设计深度后，搅拌轴再反向旋转提升，继续搅拌，确保固化剂与软土充分混合均匀。例如在软土地基上建造多层住宅时，深层搅拌法可以有效地加固地基。它可以将原本承载力较低、压缩性较大的软土转变为能够承受建筑物荷载的稳定地基。



图1 深层搅拌法

（二）高压喷射注浆法

高压喷射注浆法也是常用的地基处理技术，该技术的核心原理是利用高压设备将带有特殊喷嘴的注浆管钻入地基土层的预定位置，然后通过高压泵将浆液（通常为水泥浆）以高压高速喷射而出，冲击破坏土体。喷射出的浆液与土体颗粒搅拌混合，经过凝固固化后形成具有一定强度和防渗性能的固结体，从而改善地基的性质。在实际施工中，根据喷射流的移动方式不同，可分为旋喷、定喷和摆喷三种形式。以旋喷为例，施工时先钻孔至预定深度，然后将注浆管以一定的速度旋转提升，同时喷射高压浆液，形成圆柱状的固结体。高压喷射注浆法在处理地基时具有很强的适应性，能用于多种地质条件，如砂土地基、黏性土地基等。它可以提高地基的承载力、减少地基的沉降量，还具有良好的防渗性能。例如在一些水利工程的地基处理中，利用高压喷射注浆法可以有效地加固堤坝地基，防止渗漏。

（三）强夯法

强夯法是一种简单而有效的地基处理技术，强夯法的原理是通过重锤（一般为10-40吨）从高处（一般为6-40米）自由落下，给地基土施加一个强大的冲击能，使地基土中的孔隙被压缩，土体得到加密，从而提高地

基的承载能力和抗变形能力。在施工过程中，首先要对场地进行清理和平整，然后确定夯点的位置和间距。按照设计要求，起重机将重锤提升到预定高度后释放，对夯点进行夯击。一般需要进行多遍夯击，每遍夯击之间还可能间隔一定的时间，以便地基土中的孔隙水压力消散。强夯法的优点是设备简单、施工便捷、成本较低。在处理大面积的填土地基、湿陷性黄土地基等方面效果显著。例如在一些工业园区的建设中，对于经过大面积填方后的地基，采用强夯法可以快速有效地提高地基的密实度，满足工业厂房建设的要求。

五、地基处理优化策略

（一）精准的地质勘察

地基处理优化的首要任务是进行精准的地质勘察，这一点在深中通道项目中得到了充分体现。该项目不仅规模宏大，而且地质条件复杂，对地基处理提出了极高的要求。为了确保地基处理方案的合理性和有效性，团队在施工前进行了详尽的地质勘察工作。综合运用了钻探、原位测试和地球物理勘探等多种技术手段，对施工场地的地层结构、土质类型、物理力学性质以及地下水状况进行了全面而深入的调查。在勘察过程中，特别注意到了船机设备作业对地质条件可能产生的影响。为了确保勘察结果的准确性和可靠性，合理安排了船机设备的作业时间和地点，避免了因设备作业而导致的地质条件变化对勘察结果的干扰。通过精准的地质勘察，成功获取了施工场地的详细地质信息，为制定科学合理的地基处理方案提供了有力的数据支持。这些数据不仅帮助准确判断了地基的承载能力和稳定性，还选择合适的处理方法、优化处理设计参数提供了重要依据。深中通道项目的成功实践充分证明了精准地质勘察在地基处理优化中的重要性。

（二）因地制宜选择地基处理方法

在交通水运工程中，地基处理的合适性直接关系到工程的安全与稳定。对于软土地基，如沿海地区常见的淤泥质土，深层搅拌法是一种较为理想的选择。这种方法通过特制的搅拌机械，将水泥等固化剂与软土在原地进行强制搅拌，使软土硬结成具有一定强度和稳定性的加固土。在某跨海大桥的桥墩基础处理中，采用了深层搅拌法来处理软土地基。经过处理后，桥墩基础的承载能力显著提高，有效减少了沉降量，确保了大桥的稳定性和安全性。在砂土地基中，振冲法是常用的方法之一。振冲法利用振冲器在砂层中振动造孔，然后向孔内填入砂石等粗粒料并振捣密实，形成复合地基。在某海港码头的扩建工程中，面对大面积的砂土地基，采用了振冲法进行地基处理。经过振冲法的处理，地基的密实度和承载能力得到了显著提升，为码头的扩建提供了坚实的基础。对于湿陷性黄土地基，强夯法和灰土挤密桩法是有效的处理手段。强夯法通过重锤从高处自由落下，对地基土施加强大的冲击能，从而消除湿陷性并提

高地基承载能力。在某水运枢纽工程的引航道堤岸地基处理中，由于地基土存在湿陷性，采用了强夯法进行处理。经过处理后，地基的湿陷性得到了有效消除，承载能力显著提高，为堤岸的稳定和安全提供了保障。

（三）优化地基处理设计参数

地基处理设计参数的优化对于提高交通水运工程的地基处理效果同样至关重要，以桩基础为例，在港口码头的建设中，桩径、桩长、桩间距等参数的选择需要综合考虑地质条件、码头结构荷载要求以及波浪、潮汐等水文因素。在某海港码头的扩建工程中，设计团队对桩基础的设计参数进行了优化。通过详细的地质勘察和荷载计算，将桩径从最初设计的较大值适当减小，同时根据持力层的深度和性质调整了桩长，确保了桩端能够落在稳定且承载力强的持力层上。这一优化措施不仅满足了码头结构的安全要求，还显著节约了混凝土和钢材等建筑材料，降低了工程成本。此外，对于地基处理中的加固材料用量，设计团队也进行了精细的优化。在采用深层搅拌法处理软土地基时，通过室内试验和现场试验段的结果分析，确定了最佳的水泥用量。

（四）采用新型地基处理技术与材料

随着科技的进步，交通水运工程中也开始广泛采用新型地基处理技术和材料，以优化地基处理过程，提高工程质量和效益。例如，微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术在交通水运工程的地基处理中展现出了巨大的潜力。在某沿海港口的地基加固项目中，设计团队采用了MICP技术，利用微生物的代谢作用在地基土中生成碳酸钙沉淀，从而提高了地基土的强度和稳定性。这一技术不仅环保可持续，还有效地解决了地基承载力不足的问题，为港口的长期稳定运行提供了有力保障。此外，新型的土工合成材料也在交通水运工程中得到了广泛应用。在某跨海大桥的地基处理中，设计团队选用了高性能的土工格栅材料。

（五）加强施工过程管理与质量控制

在交通水运工程的地基处理施工过程中，加强管理和质量控制同样至关重要。为确保地基处理效果，必须建立完善的施工质量管理体系，并严格执行。以某跨海大桥的地基处理工程为例，在深层搅拌法施工中，明确了搅拌轴的下沉和提升速度、水泥浆的喷射压力和流量等参数的控制范围，以确保施工过程的精确性和稳定性。同时，对施工人员的专业素质和技能水平进行了严格的培训和考核，确保他们熟悉施工工艺和质量要求。在强夯法处理桥墩基础时，特别强调了夯锤的落距、夯击次数等参数的准确控制，这需要施工人员具备较高的操作技能。此外，现场监督检查也是必不可少的环节，安排了专人负责检查桩孔的深度、直径等是否符合设计要求，以及灰土的配比和夯实质量是否达标。在施工过程中，还采用了静载试验等合适的检测方法，对地基处理效果进行实时监测。

（六）考虑环境与可持续性因素

在交通水运工程的地基处理优化过程中，环境与可持续性因素必须被充分考虑。以某海港码头的扩建工程为例，在采用强夯法处理地基时，特别注重了对周边环境和居民的影响。合理安排了施工时间，避免在夜间或清晨进行强夯作业，以减少噪音和振动对周边居民和敏感设施的干扰。同时，加强了施工过程中的环境监测，确保施工活动不对地下水造成污染。此外，在地基处理材料的选择上，也注重了可持续性。优先选择了可再生、可循环利用的材料，如使用再生骨料代替部分天然骨料，以减少对自然资源的开采。这不仅有助于降低工程成本，还体现了对环境保护的承诺。在湿地地区进行地基处理时，特别谨慎。采用了有利于湿地生态保护的地基处理方法，如采用生态护岸技术，避免破坏湿地的生态平衡。

结束语

综上所述，沉管隧道施工技术与地基处理优化是一个复杂且系统的工程领域。通过不断探索新的施工技术、改进地基处理方法，能够提高沉管隧道的建设质量和安全性。这不仅有助于推动交通基础设施的发展，更能为城市的可持续发展奠定坚实基础。在未来的工程实践中，应持续关注技术创新和经验积累，以应对不断变化的工程需求和挑战。

参考文献

- [1] 李云刚, 吕勇刚, 张涛, 等. 大连湾海底隧道地基处理及基床整平关键技术[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 91-96.
 - [2] 朱伟, 王璐, 钱勇进, 等. 水下隧道中人工岛建设现状及主要问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(03): 72-83+120.
 - [3] 胡传鹏, 张涛, 李云刚. 沉管隧道下穿防波堤基础设计及沉降控制[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(05): 39-43+57.
 - [4] 蒋钦权, 谷任国, 邓磊, 等. 沉管隧道地基砂流法处理的充满度试验及分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(03): 24-28.
 - [5] 黄道金, 刘新明, 黎忠豪, 等. 沉管隧道水下深层水泥搅拌桩清除施工技术研究[J]. 港工技术, 2021, 58(06): 92-95.
 - [6] 李斌, 高潮, 张嘉莹. 港珠澳大桥沉管隧道瞬时沉降规律分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 263-266.
 - [7] 程世龙. 沉管隧道技术的应用与现状分析[J]. 中国设备工程, 2021, (14): 199-200.
 - [8] 许昱, 徐国平, 付佰勇, 等. 离岸人工岛岛隧结合部沉管隧道基础沉降控制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S1): 338-344.
- 作者简介: 王为民, 1968.07.31, 男, 江苏省灌云县, 汉族, 本科, 高级职称, 研究方向: 工程管理。