

基于数值模拟的软土路基水泥搅拌桩加固效果分析

胡元

湖北交投建设集团有限公司，湖北省武汉市，430000；

摘要：随着基础设施的大力发展，面对不同环境、不同地质，基础建设出现了不同种类的问题，特别是在软土地区，路基的建设面临着严重的地基沉降问题。软土的物理力学性质和工程特性使其在承载力、变形性和抗剪强度等方面存在较大不足，导致路基的安全和使用寿命受到了严重影响。因此，针对软土路基加固技术的研究显得尤为重要。水泥搅拌桩作为一种有效的加固手段，因其施工简便、经济且能显著改善土体的力学性质而受到广泛关注。通过将水泥与软土混合，形成具有较高强度和稳定性的复合材料，不仅提高了土体的承载能力，还显著降低了沉降风险。这种方法在实际应用中展现出了良好的效果，成为解决软土路基问题的重要技术之一。本文旨在通过数值模拟的方法，系统分析水泥搅拌桩在软土路基中的加固效果，为工程设计提供理论依据。

关键词：数值模拟；软土路基；水泥搅拌桩；加固效果

DOI：10.69979/3029-2727.24.12.008

1 水泥搅拌桩加固原理

软土是指含有较高有机质和水分的细颗粒土，其物理和力学性质与其他土壤有显著差异。软土的工程特性主要包括高含水率、低承载力、较大的压缩性、低强度、以及较高的变形特性。水泥搅拌桩加固技术是一种有效的地基处理方法，广泛应用于软土路基的加固。其基本原理是通过将水泥与土体混合，形成具有一定强度和稳定性的桩体，从而改善土体的物理和力学性质。

水泥搅拌桩的形成过程通常包括搅拌、注浆和固化三个主要步骤。在搅拌过程中，专用机械设备将水泥浆与周围的土体充分混合，确保水泥能均匀分布在土体中。通过这种方式，水泥浆中的水分与土体中的颗粒发生反应，促使水泥与土粒之间形成粘结，从而提高土体的承载能力。搅拌桩的直径、长度和间距可以根据工程要求进行设计，以满足不同地基的加固需求。

水泥搅拌桩加固的机制主要包括以下几个方面。首先，水泥浆的加入能够填充土体中的空隙，减少土体的孔隙比，提高其密实度。其次，水泥固化后形成的桩体能够有效传递外部荷载，降低周围土体的应力水平，减小沉降量。此外，水泥搅拌桩的存在改变了土体的应力状态，改善了土体的抗剪强度，增强了其稳定性。

2 数值模拟方法与模型建立

2.1 数值模拟软件选择

在数值模拟的研究中，软件的选择至关重要。针对路桥软土路基水泥搅拌桩加固效果分析，须考虑软件的

功能、可靠性及适用性，以确保模拟结果的准确性与可信度。

常用的数值模拟软件包括 Midas/GTS、ABAQUS、PLAXIS 和 FLAC 等。这些软件在土木工程领域具有广泛的应用，能够处理复杂的土体力学问题。ABAQUS 以其强大的有限元分析能力著称，适用于各种非线性问题，能够有效模拟水泥搅拌桩的加固过程。其在处理大变形和接触问题时表现出色，适合复杂的土体与结构相互作用的分析。

PLAXIS 则专注于地基工程和地下工程分析，特别适合土体的应力分析和沉降计算。其用户界面友好，能够快速建立模型并进行参数设置。此外，PLAXIS 还提供了针对软土的特定模型，能够更准确地反映软土的工程特性。FLAC 是一款基于离散元法的程序，适合模拟大变形问题和土体的动态响应。其在处理土体破坏和流动性问题上具有优势，能够对水泥搅拌桩在不同荷载下的行为进行深入分析。

选择合适的软件还需考虑模型的复杂程度和计算资源。例如，对于简单的加固效果分析，ABAQUS 或 PLAXIS 可能较为适用；而面对复杂的动态响应和大变形，FLAC 可能提供更为有效的解决方案。

在实际应用中，研究团队需综合考虑上述软件的特点、项目需求、预算及计算资源等因素，选择最适合的数值模拟软件，以确保加固效果分析的科学性和有效性。

2.2 模型参数设定

在数值模拟中，模型参数的设定是确保模拟结果准

确性和可靠性的关键步骤。针对水泥搅拌桩加固软土路基的研究,模型参数的选择需综合考虑软土的物理力学特性、水泥搅拌桩的材料特性及其相互作用。

软土的参数主要包括:土体的黏土比重、内摩擦角、凝聚力、弹性模量等。通过现场取样及实验室试验,可以获得这些参数的具体数值。水泥搅拌桩的材料特性同样至关重要。水泥的抗压强度、弹性模量及其与软土的粘结力等参数需被精确设定。一般来说,水泥搅拌桩的抗压强度可设定为20 MPa至30 MPa,弹性模量在25 GPa至30 GPa之间。为了更好地模拟水泥与软土的相互作用,需考虑水泥与土体之间的粘结力,通常设定为土体凝聚力的50%至70%。在模型建立的过程中,需明确桩体的几何参数,包括桩的直径和长度。

2.3 边界条件与加载方式

在数值模拟中,边界条件和加载方式对模型的准确性和结果的可靠性具有重要影响。边界条件的设定通常包括固定边界、自由边界和接触边界等多种类型。针对软土路基的特点,采用适合的边界条件以反映土体的真实受力状态是必要的。固定边界通常用于模拟路基底部,以防止模型在计算过程中发生过大的位移,确保计算的稳定性。对于路基的侧面,可以选择自由边界以模拟自然土体的扩展和变形行为。

加载方式方面,考虑到实际工程中路桥施工时的荷载特征,通常采用静载和动载的组合方式。静载主要包括路桥的自重及静态交通荷载,这可以通过均匀分布荷载的形式施加在路面上,模拟实际使用状态下的荷载作用。此外,动载则涉及到车辆行驶时产生的瞬时冲击,通常使用简谐荷载或脉冲荷载进行模拟,以反映车辆通过时对路基的瞬时影响。

在模型建立过程中,边界条件与加载方式的综合考虑需要与实际工程情况相结合。例如,在某些特定情况下,可能需要通过施加不同的荷载幅值和频率,以观察软土在不同荷载条件下的响应。这种方法可以帮助分析软土路基在实际使用状态下的变形模式和承载能力,为加固设计提供依据。

3 基于数值模拟的软土路基水泥搅拌桩加固效果

3.1 工程概况

广深沿江高速公路路段靠近海域,路基段分布海底淤泥,成流动或流塑状,其承载力小于 $<80\text{kPa}$,属高含水率,高压缩性,低渗透性,低强度的软弱土体,软

土层较厚,地层主要由杂填土、粉质黏土及淤泥质土构成。根据地质勘探结果,路基的物理力学性质达不到相关规范标准,需采取相应措施。若采用换填法处理,需清除的淤泥质土层深度约为0.7至16.9米,这将涉及大量土体的开挖及外运,及外购大量优质填料,将会大大增加工程成本。鉴于工程实际情况,综合考虑软土路基处理措施的经济性以及合理性,计划采用水泥搅拌桩技术对软土路基进行加固。水泥搅拌桩的设计桩径为0.5米,桩间距为1.5米,桩长则为10至20米,具体见图1。

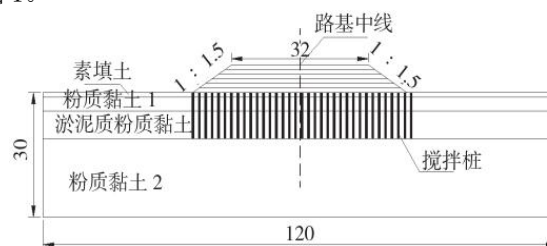


图1 横断面示意图 (单位: m)

3.2 有限元模型建立与分析

通过Midas/GTS有限元软件对该软基处理划分结构单元并构建本构模型,能够有效的解决静力和动力问题,通过对典型软基断面进行模拟分析,得出结论数据,指导现场实际施工。在模拟中,土层及路堤填筑土体采用摩尔-库伦(M-C)本构模型,而水泥搅拌桩则采用弹性本构模型,其直径为0.5m,桩长为10m。整个模型的土层单元采用二维平面模型进行模拟,水泥搅拌桩则以一维结构单元(梁单元)进行模拟。模型尺寸设定为 $120\text{m} \times 30\text{m}$,路堤高度为6m,与图1相对应。在网格划分过程中,除路堤土的网格密度为1米外,其余模型的网格密度均为2m。路堤填土部分根据分层填土原则建立网格组,每层网格组高度为1m,共计6层。建模完成后的模型见图2。

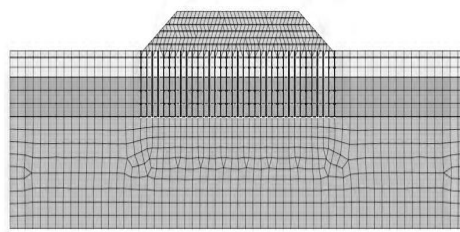


图2 有限元模型

3.3 计算结果分析

在数字模拟中,对不采用水泥搅拌桩加固和采用水泥搅拌桩加固的方案结果进行了对比分析,收集两种方案路堤顶面的竖向位移值进行比较,见图3。图中横轴

线 0 点表示路基顶面最左侧位置,横轴线 16 m 处表示路基中线位置,横轴线 32 m 处表示路基中线位置。

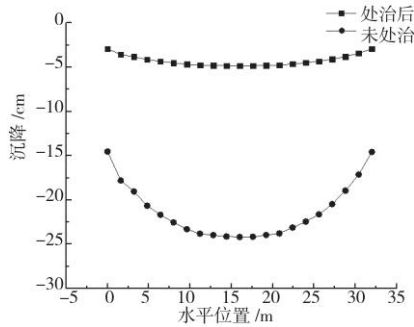


图 3 软土路基处治前后沉降对比

从图 3 观察可知,路基在未采取加固措施前,路基沉降呈现出中间大、两侧小的分布特征,路基顶面沉降值最大达到了 24cm,处于路基的中线位置,最小值为 15cm,处于路基的边线位置。在实施水泥搅拌桩措施后,沉降的变化趋势与未处理前保持一致,但处理后的路基中线和边线的沉降值均大幅度下降,分别降低至 4cm 和 2cm,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)对于软土路基施工后沉降的相关要求,表明软土路基经水泥搅拌桩加固后,沉降得到了有效的控制。

图 4 展示了软土路基地面在处理前后的水平位移变化情况。处理前,路堤底面的水平最大位移出现在水平位置 5m、45m 处,呈现出相对于路堤中线对称增加的分布模式。在采取水泥搅拌桩措施后,路基地面的水平位移相对减少,最大值为 1.3cm,与处理前的变化趋势保持一致。这表明水泥搅拌桩的实施对于减小路堤坡脚的水平位移及坡脚变形的控制具有积极作用。

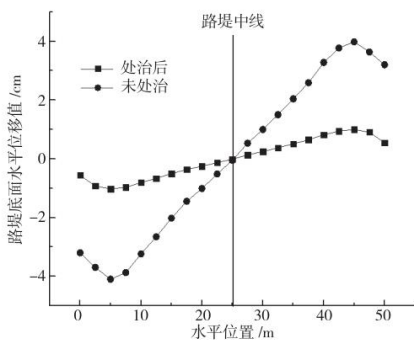


图 4 处治前后路堤底面水平位移对比

整体来看,水泥搅拌桩加固软土路基后,不仅有效的控制了路堤的竖向沉降,还显著改善了路堤底面的水平位移状况。通过对比分析,可以明显看出水泥搅拌桩加固后大大提升了软土物理力学性能,的获得了较好的改良效果。

为了进一步验证加固效果,还需对加固区域的土体

应力状态进行分析。图 5 展示了软基处治前后土体的竖向应力对比图。土体在经过水泥搅拌桩的加固后,软土地基的压缩性得到了降低,地基土应力重新分布,土体抗剪强度得到提升,路堤沉降变形减小,路堤沉降得到有效控制。

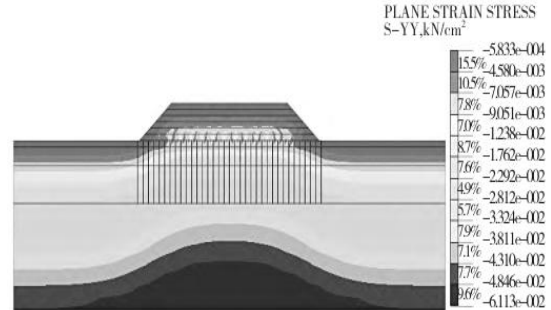


图 5 处治前后路基土体竖向应力对比

4 结语

本文通过数值模拟对路桥软土路基水泥搅拌桩加固效果进行了系统分析。从水泥搅拌桩的加固原理出发,深入探讨了其加固机制,为理解加固过程提供了理论基础。在数值模拟方面,综合考虑多种因素选择合适软件,合理设定模型参数、边界条件与加载方式,确保了模拟结果的准确性和可靠性。结合实际工程案例,通过有限元模型分析,对比加固前后路堤顶面竖向位移、路堤底面水平位移以及路基土体竖向应力等数据,清晰地展示了水泥搅拌桩加固软土路基的显著效果。研究表明,水泥搅拌桩技术在控制路堤沉降、改善水平位移和调整地基应力分布方面表现出色,能够有效提高软土路基的承载能力和稳定性,满足工程设计要求。这不仅为该工程的实际施工提供了科学依据,也为类似软土路基处理工程提供了可借鉴的方法和经验。未来的研究可以进一步结合现场监测数据,对数值模型进行优化和验证,提高模拟的精度和可靠性。同时,可以深入研究不同地质条件、桩体参数和荷载工况下水泥搅拌桩的加固效果,拓展该技术的应用范围,为软土地区路桥建设提供更全面、更有效的技术支持。

参考文献

- [1] 华正晓. 道路工程中软土路基处理技术探讨 [J]. 中国设备工程, 2022 (3): 241-243.
- [2] 毛莹莹. 水泥搅拌桩加固软土路基的数值模拟分析 [J]. 山东交通科技, 2023 (6): 45-47, 51.
- [3] 罗良繁. 软土路基填筑及地基处理设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.