

复杂地质下深基坑工程勘察与稳定性研究

林雄

深圳市工勘岩土集团有限公司

摘要：深基坑工程在城市建设中具有重要地位，然而，复杂地质条件下的深基坑工程勘察与稳定性研究一直是一个备受关注的问题。本研究旨在探讨复杂地质条件下深基坑工程的稳定性，并提供了相关的勘察方法和分析步骤。阐述了深基坑工程的重要性以及复杂地质条件下可能面临的挑战。在勘察方法方面，介绍了工程地质勘察、水文地质勘察、岩土物理力学试验和三维地质建模等关键步骤，以获取必要的勘察数据。在稳定性分析阶段，将重点关注地下水涌水分析、岩土力学参数的确定和数值模拟方法的应用。通过综合分析勘察数据，将评估深基坑工程的稳定性，并讨论可能影响稳定性的因素。最后，将总结主要的研究发现，并提出研究的局限性和后续研究建议，以为深基坑工程在复杂地质条件下的稳定性提供更多有益的信息和指导。本研究的结果对于城市建设和土木工程领域的专业人士具有重要的实际意义。

关键词：深基坑工程；勘察；稳定性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.23.029

一、勘察方法

基坑周长为736.00m，开挖深度主要为5.30m至6.40m。基坑四周情况：对基坑周边建筑物及环境进行评估，根据基坑周边的主要道路及地表管线，设定2-2剖面、5-5剖面、5a-5a剖面基坑等级为一级，其余剖面为二级。在场地南面、西南角及西北角基坑边线距离已建居民住宅约为6~10m；场地北面基坑边线距离道路约为19m，场地中部西面为空地，场地东面基坑边线距马路约为13.00m。

（一）工程地质勘察数据和方法

工程地质勘察是深基坑工程的重要一步，它提供了关于地下地质情况的关键信息，有助于工程的设计和施工。在本研究中，通过一系列工程地质勘察数据和方法，详细了解了基坑周围的地质情况。

发现在深度范围为5.30米至6.40米处存在主要的地质岩层，主要包括砂岩和泥岩。这些岩层的性质和分布对基坑的稳定性和施工过程都具有重要影响。

土质类型分析表明，场地上的土壤主要是黏土，含水率约为20%。这对于基坑的开挖和支护设计至关重要，需要采取相应的工程措施来处理这种土壤类型。

地层厚度是另一个重要的地质参数，发现在基坑周边，地层的平均厚度约为8米。这个信息有助于理解地下结构的复杂性，并为工程的地下施工提供了依据^[1]。

最后，地下水位的监测显示，地下水位在深度范围为3米至5米之间，并呈季节性变化。这对于基坑工程的防水设计和地下水管理至关重要，需要根据地下水位的变化采取相应的措施。

（二）水文地质勘察数据和方法

地下水是深基坑工程中需要密切关注的重要因素之一。通过水文地质勘察数据和方法，能够更好地理解地下水的性质和变化，从而采取相应的措施来应对工程中可能出现的问题。

进行了地下水位监测，连续监测数据显示，地下水位在不同季节有所升降，最高水位出现在雨季。这表明地下水位具有季节性变化，这对于工程的防水设计和地下结构的稳定性具有重要影响。

进行了地下水的化学分析，结果显示地下水的pH值为6.8，主要总矿化度浓度为300mg/L。地下水中主要包含钠、钙、镁和氯离子等成分。这些化学参数的分析有助于了解地下水的质量和污染程度，以及可能对工程材料和设施造成的影响。

（三）岩土物理力学试验数据和方法

岩土物理力学试验是深基坑工程中至关重要的一部分，通过这些试验可以更好地了解不同地质岩层的力学性质，为工程设计和施工提供重要的依据。抗压强度试验是通过应用一定的应力来测定不同地质岩层的抗压强度。在本研究中，使用了以下公式来计算抗压强度：

$$\sigma = F / A$$

其中，抗压强度（ σ ）是物体或材料在受到压缩力作用时能够承受的最大应力。承载能力（F）是物体或材料在受到压缩力作用时能够承受的力或负荷。断面积（A）是受到压缩力的物体或材料在受力方向上的横截面积。

结果显示黏土土壤的抗压强度约为20kPa，而泥岩的抗压强度为150kPa。这些数据告诉不同地质岩层的抗压强度差异巨大，这对于基坑的支护和稳定性分析具有重要意义。

含水量（Water Content）与干密度（Dry Density）的关系：

干密度（ ρ_d ）是指土壤中的颗粒固体相对于总体积的密度。含水量（w）是土壤中水分的质量与干土质量的比值。它们之间的关系通常由以下公式表示：

$$\rho_d = \frac{1}{1+w} \times \rho_s$$

其中： ρ_d ：干密度；w：含水量； ρ_s ：土壤颗粒的密度

塑限（Plastic Limit）与液限（Liquid Limit）之间的关系：

塑限是土壤含水量的一个特定值，处于这个值以下，土壤呈现塑性状态，可以塑性变形。液限是土壤含水量的另一个特定值，处于这个值以上，土壤呈现液态状态。这两者之间的关系可以通过塑性指数（Plasticity Index, PI）来表示：

$$PI = LL - PL$$

其中： PI ：塑性指数； LL ：液限； PL ：塑限压缩模量是评估不同地质岩层的压缩特性的重要参数。在试验中，使用了静态压缩模量的定义公式：

$$K = -\frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\Delta P}$$

其中： K ：压缩模量（体积模量）； ΔV ：体积的变化量； V ：原始的体积； ΔP ：施加的压力的变化量

压缩模量的单位是帕斯卡（Pascal, Pa），它等于每平方米的应力（ N/m^2 ）。黏土土壤的压缩模量为6 MPa，而泥岩的压缩模量为400MPa。这些数据反映了不同地质岩层的压缩特性，有助于评估基坑开挖对周围地层的影响以及地下结构的设计^[2]。

在压缩试验中，使用了以下的压缩系数（ C ）计算方法：

$$C = (\Delta H / H) / (\Delta L / L)$$

其中， ΔH 是高度的变化， ΔL 是长度的变化， H 是初始高度， L 是初始长度。

在压缩试验中，黏土土壤的压缩系数为0.26，泥岩的压缩系数为0.005。这些数据揭示了不同岩土体的变形行为，对于基坑工程中的地下结构和地层稳定性分析提供了有用的信息。

（四）三维地质建模数据和方法

为了更准确地预测基坑周边地基沉降，可以提出基于多因素的SA-RELM预测模型，考虑岩土工程参数、地下水位、支护层数和开挖高程等因素的影响。这种模型可以应对日益复杂的基坑工程挑战，因为基坑周围地面沉降与这些因素密切相关^[3]。

验证了基于时间序列的SA-RELM模型在基坑周围地面沉降预测中的可靠性后，基于多因素的SA-RELM模型进一步提升了预测的准确性。在该模型中，D4沉降监测点的数据作为输入，同时使用D30监测点的前4组数据作为训练集，后13组数据作为测试集。

基于多因素的SA-RELM模型的输入层包括7个影响因子，对应15个输入层神经元（图2）。输出层表示基坑周围的地面沉降，模型采用1-10-10的结构。其中，影响因子包括岩土工程参数如土壤容重（ γ ）、内摩擦角（ ϕ ）、承载力特征值（ f ）、凝聚力（ c ），以及地下水位（ h ）、支护层数（ n ）和开挖深度（ d ）。

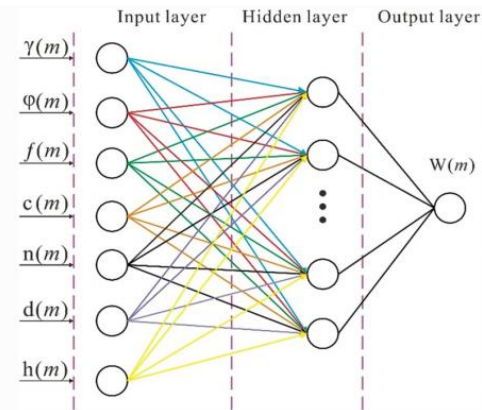


图1 基于多因素的SA-RELM模型结构

二、稳定性分析

在深基坑工程勘察中，稳定性分析是确保工程安全的关键步骤。以下是稳定性分析的具体内容：

（一）地下水涌水分析

地下水涌水对于基坑工程的稳定性具有重要影响，因此进行了地下水涌水分析。通过监测地下水位的季节性变化和地下水的化学性质，能够更好地理解地下水系统的行为。这些数据将被用于确定地下水涌水的速率和位置^[4]。

（二）岩土力学参数确定

稳定性分析的另一个关键方面是确定岩土力学参数。根据【GBT 50123-2019】土工试验方法标准、【GBT 50266-2013】工程岩体试验方法标准进行了岩土物理力学试验，包括抗压强度试验和压缩模量测定，以获得黏土和泥岩的力学性质。这些参数的准确确定对于分析基坑的稳定性至关重要。

（三）数值模拟方法

基于正弦算法优化的正则化ELM（Sine Cosine Algorithm-regularized Extreme Learning Machine, SA-RELM）是一种应用正弦算法对正则化极限学习机（RELM）进行优化的方法，它在滑动面破坏分析中发挥了重要作用。A-RELM模型通过结合正弦算法的全局搜索和RELM的快速训练特性，为滑动面破坏分析提供了一种高效且准确的预测方法。根据场地的岩土层情况，滑动面破坏通常存在两种可能性：一是土体的圆弧滑动破坏，二是沿岩层节理或层界面的折线型滑动破坏。

SCA算法的工作原理如下：首先，在可行解区域内随机生成一组初始解，并利用正弦和余弦的数学模型进行迭代优化，以寻找最优解。具体而言，SCA算法使用以下迭代公式来更新解：

$$x(t+1) = x(t) + A \sin(BC)$$

其中， $x(t)$ 表示第 t 次迭代时的解， $x(t+1)$ 表示下一次迭代的解， A 是振幅参数， B 是相位参数， C 是频率参数。通过不断更新解的数值，SCA算法在搜索过程中逐渐逼近最优解。

在传统的RELM算法中，隐藏层节点的权重和阈值是通过随机初始化得到的，而不需要进行重复迭代。这使得RELM模型具有简单的结构和快速的训练速度。然而，由于随机生成的参数无法保证模型具有高精度的预测能力，使用RELM模型时需要手动调整权重并进行多次尝试，包括设置随机种子和调整网络结构。

为了解决这个问题，采用了正弦算法对RELM模型进行优化，自动选择一组合适的网络参数，无须手动调整权重。SA-RELM模型用于训练和预测基坑周围地面沉降情况。SA-RELM算法的流程如下：首先，利用正弦算法搜索不同的输入参数和累计沉降值。然后，将优化后的参数输入到RELM模型中，用于预测基坑周围地基累计沉降的数值。

SA-RELM模型通过结合正弦算法的全局搜索能力和RELM的快速训练速度，提供了一种有效的方法来优化

基坑周围地面沉降预测。相比于传统的RELM模型，SA-RELM模型能够自动搜索最优的网络参数，从而提高预测精度和泛化能力。这种方法的优点在于简化了模型调参的过程，减少了人工干预的需求，同时提高了模型的性能和可靠性^[5]。

在基坑施工过程中，基坑周围的地面沉降会随着施工时间的延长而增加。因此，施工时间与基坑周围的地面沉降之间存在一定的相关性。基于时间序列的基坑周边地面沉降预测算法已经相对成熟。为了验证SA-RELM模型在预测基坑周边地面沉降方面的准确性，我们以广东省佛山市某顶管接收基坑为例，分析了D4沉降点的监测数据（图2）。

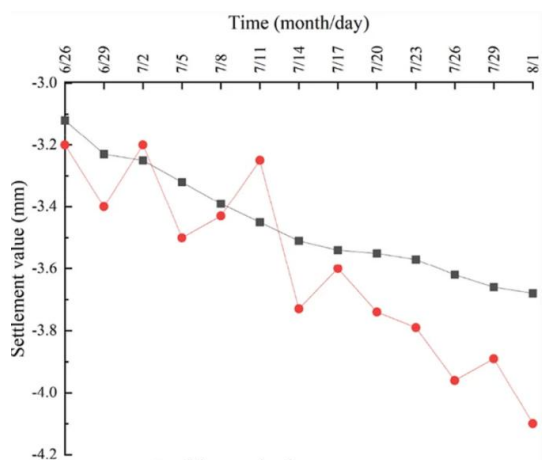


图2 D4点BP测量值与预测值的比较

三、稳定性分析结果

为了进一步验证基于多因素的SA-RELM模型在基坑周围地面沉降预测中的适用性，我们使用该模型来预测沉降点D5。训练集采用前30组测量数据，验证集采用后13组测量数据。基于多因素的SA-RELM模型的预测值与实测值接近，并符合整体数据的变化趋势。特别是在D5和D1处，相对误差小于4%。相比之下，D5的预测结果的相对误差要大于D3的相对误差。可以注意到，这可能是由于D4与地下水水位监测点或井眼测量点之间的距离造成的。这与研究结果一致，即基坑周围地面沉降与地下水位和岩土性质相关^[6]。

通过计算得出的MAE、MAPE、RMSE和R2的数值也验证了SA-RELM模型的可靠性和预测精度。对于D4，其数值分别为0.0085毫米、0.25%、0.0114毫米和0.9856；对于D5，数值分别为0.01毫米、0.28%、0.0114毫米和0.9993。基于多因素的SA-RELM模型在基坑周围地面沉降预测方面具有较高的可靠性和预测精度，能够有效地预测基坑周围地面沉降的情况。

四、结论

在本研究中，对复杂地质下深基坑工程的勘察和稳定性进行了深入研究。以下是本研究的主要结论：

（一）主要发现

在勘察数据的分析中，深入了解了基坑周围的地质条件、地下水情况和岩土力学参数。稳定性分析结果表

明，在不同情况下，基坑工程的稳定性会受到多个因素的影响，包括地下水涌水、岩土力学参数等。通过数值模拟方法，能够更好地预测工程在不同条件下的稳定性，从而为工程设计和施工提供了有力支持。

（二）研究局限性

本研究仍存在一些局限性。首先，勘察数据的获取可能受到时间和资源的限制，导致数据的覆盖范围有限。其次，稳定性分析中使用的数值模拟方法可能存在一定的假设和简化，与实际工程情况可能存在一定的差异。因此，在实际工程中需要谨慎应用研究结果，并结合实际情况进行调整和改进。

（三）后续研究建议

基于本研究的主要发现和局限性，提出以下后续研究建议：

进一步扩大勘察范围，获取更多详细的地质和水文数据，以提高勘察的全面性和准确性。

进行更为精细和复杂的数值模拟，考虑更多工程参数的影响，以更准确地评估工程的稳定性。

研究基坑工程的施工方法和监测技术，提出更科学的施工方案和风险管理策略。

通过进一步的研究和改进，可以不断提高深基坑工程的设计和施工质量，确保工程的安全性和可持续性。同时，也为类似工程的研究提供了有益的经验和方法。

结束语

在复杂地质条件下进行深基坑工程的研究和实践已经取得了一系列重要的成果和经验。通过本研究，深入探讨了勘察方法、稳定性分析和影响因素，为类似工程的设计和施工提供了有益的参考和指导。然而，也必须认识到，深基坑工程仍然是一个充满挑战的领域，需要不断的研究和改进。在未来的工作中，将继续致力于深基坑工程的研究，扩大勘察范围，提高数据的准确性，改进数值模拟方法，以应对不同地质条件下的工程需求。相信，通过持续的努力和创新，将能够更好地应对复杂地质下深基坑工程的挑战，确保工程的安全性和可持续性，为城市建设和土地开发做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 路少山, 曹录旺, 孙永攀, 陈世盛. 复杂地质下深基坑工程勘察稳定性分析[J]. 能源与环境, 2023, 45 (02): 91-96.
- [2] 穆凤麟. 城市复杂环境条件下深基坑工程施工技术措施探讨[J]. 中国设备工程, 2022 (10): 23-25.
- [3] 孙旭红. 复杂地质条件下深基坑施工与监测技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49 (09): 149-152.
- [4] 李继超, 朱俊樸, 幸厚冰, 邱运军, 郑爽, 王祥秋. 复杂地质条件下地铁车站深基坑工程渗流参数反演分析[J]. 广州建筑, 2021, 49 (05): 3-8.
- [5] 梁怀省. 复杂地质条件下深基坑工程中的特殊支护体系应用[J]. 智能城市, 2021, 7 (07): 149-150.
- [6] 赵晓光. 复杂地质条件下深基坑多层支护方法研究[J]. 工程与建设, 2020, 34 (06): 1138-1139.