

# 复杂地质条件下房屋建筑工程基础结构设计与稳定性评估

郭从明

中冶南方城市建设工程技术有限公司，湖北武汉，430070；

**摘要：**随着我国城市化进程的不断推进，建筑用地逐渐向地质条件复杂区域扩展，基础结构设计与稳定性评估成为确保工程安全的关键。本文首先分析了软土、岩溶、滑坡与地震液化等不同复杂地质条件对基础设计的影响机制，然后依次提出了基于地质建模的基础设计方法、基础选型与优化措施以及稳定性评估体系，旨在推动复杂地质条件下基础工程设计的理论发展和技术进步。

**关键词：**复杂地质；建筑工程；基础结构设计；稳定性评估

**DOI：**10.69979/3029-2727.26.01.038

## 引言

随着城市建设规模的不断扩大，房屋建筑工程面临的地质条件日趋复杂，软土、喀斯特地貌、滑坡与崩塌地质、地震液化场地等不良地质条件均对基础结构设计与稳定性评估提出了严峻挑战。传统经验设计方法难以满足现代工程对精确性与可靠性的要求，亟需探索更为科学系统的设计评估方法。系统研究复杂地质条件下基础结构设计关键技术，建立更为完善的稳定性评估方法，可以提升复杂地质条件下基础工程设计水平，保障建筑结构全生命周期安全，为工程实践提供可落地的技术方案。

## 1 复杂地质条件对基础设计的影响分析

复杂地质条件不仅关系到房屋的基础选型和尺寸确定，还会直接影响其结构的长期稳定性和安全性。不同地质条件具有独特的工程特性，需要设计人员采取针对性地应对策略。软土地基是一种常见的复杂地质条件，其主要特点是含水量高、压缩性大、强度低和渗透性差。在软土地基上建造房屋建筑，基础面临沉降过大和不均匀沉降的风险，可能导致建筑物开裂或倾斜，故设计时要考虑采取排水固结、搅拌桩加固或预应力管桩等地基处理措施，以提高地基承载力和减小工后沉降。喀斯特地貌是另一种典型的复杂地质条件，其主要特征是地下溶洞、土洞和岩面起伏大，导致地基岩体不均匀性和不确定性显著。在喀斯特地区进行基础设计，首要任务是查明岩溶发育规律和溶洞分布特征，包括溶洞的位置、大小、顶板厚度、填充情况等。基础选型应考虑岩溶场特殊性，可采用桩基础穿越溶洞、筏基跨越溶洞或灌浆加固溶洞等不同方案。

滑坡与崩塌地质条件下的基础设计应以边坡稳定性评估为基础，考虑坡体蠕变、地震触发和暴雨入渗等

不利因素。在这类场地建造房屋建筑，应当采取抗滑桩、挡土墙、锚杆加固等必要的抗滑措施，确保基础与边坡的整体稳定性。地震液化场地是一种潜在的危险地质条件，饱和砂土或粉土在地震作用下孔隙水压力上升、有效应力下降，导致土体失去强度而发生液化。在液化场地进行基础设计，要科学评估液化潜势和液化后沉降，采取适当的抗液化措施。

除了上述单一地质条件外，实际工程中常遇到多种复杂地质条件交织的情况，如软土与岩溶共存、滑坡与液化兼具等，使得基础设计更加复杂。这种情况下，相关人员一定要开展更为精细的工程地质勘察，采用多种勘探方法和手段，全面掌握地质条件。基础设计则需采取综合处理方案，兼顾不同地质条件的特点，进行多工况、多参数的分析计算<sup>[1]</sup>，确保基础在各种可能条件下的安全可靠。

## 2 复杂地质条件下基础结构设计

### 2.1 基于地质建模的设计方法

基于地质建模的设计方法是复杂地质条件下基础设计的核心技术，其基本思路是通过三维地质模型直观表达地质条件空间分布，为设计提供可靠依据。基于钻孔数据、地球物理勘探结果和地质调查资料，三维地质建模可利用空间差值和地质统计方法重构地层界面、断层、溶洞等地质体的三维形态。高质量的三维地质模型能够清晰展示复杂地质条件的空间变异性，帮助设计人员识别潜在工程地质问题，为基础选型和布置提供科学依据。

在三维地质模型的基础上，进行参数化表征是确保设计准确性的关键环节。岩土参数的空间变异性需要运用合理的统计方法进行表征，包括参数的平均值、标准差和相间距离等。对于复杂地质条件，采用随机场理论

描述土性参数的空间变异性更为合理，可以避免过于保守或危险的设计决策。基于可靠地质模型和参数表征的设计方法，能够充分考虑地质条件的不确定性，提高基础设计的可靠性和经济性。

地质建模还需考虑地下水分布和地应力场特征，这些因素对基础设计有重要影响。地下水位高低影响土体的有效应力和基础浮力，地下水流动则关系到基坑降水和基础抗浮设计<sup>[2]</sup>。地应力场特征直接影响土-结构相互作用，特别是在深基坑和地下工程中，初始地应力状态对围岩稳定性和支护结构设计具有决定性作用。因此，基于地质建模的设计方法是一个多场耦合的分析过程，需要综合考虑地质体、地下水和应力场的相互作用。

## 2.2 基础选型与优化措施

### 2.2.1 桩基础设计

桩基础是复杂地质条件下常用的基础形式，尤其适用于上部软弱土层较厚、建筑物荷载较大的情况。桩基础设计一定要确定桩型、桩长、桩径和桩距等参数，确保桩基承载力和沉降满足规范要求。在复杂地质条件下，桩基设计需特别注意负摩阻力的影响，当桩周土体沉降大于桩身沉降时，会产生向下的负摩阻力，增加桩基荷载和沉降。对于软土地区、填土场地和湿陷性黄土地区等可能产生负摩阻力的场地，桩基设计应采取相应措施，可设置隔离层、增大桩径或提高承载力安全系数。

### 2.2.2 筏板基础应用

筏基适用于地基承载力较低、荷载较大的情况，也常用于溶洞发育地区跨越隐伏溶洞。筏基设计的关键是确保基础具有足够的刚度和强度，协调不均匀沉降。在复杂地质条件下，可以设置基础梁、加大板厚或采用预应力技术的方式提高筏基的整体刚度。对于岩溶强烈发育地区，可采用桩筏复合基础，结合桩基穿越和筏基跨越的优点，提高基础对复杂地质条件的适应能力。

### 2.2.3 地基处理技术

地基处理是复杂地质条件下基础优化的重要措施，其旨在改良地基土体的工程性质，提高承载力、减小沉降。常用的地基处理方法包括换填法、排水固结法、强夯法、搅拌桩法和高压喷射注浆法等。选择合适的地基处理方法需要综合考虑土质条件、处理深度、施工周期和工程造价等因素。例如，对于厚层软土地基，可采用排水固结结合堆载预压的方法；对于液化砂土地基，可采用振冲碎石桩或强夯法；对于溶洞、土洞发育地区，可采用注浆填充加固的方法。

## 2.3 数值模拟与设计验证

数值模拟技术为评估复杂地质条件下基础结构的

受力与变形行为提供了关键依据，是现代基础工程设计的核心环节。在构建能够反映地质环境、基础形式与上部结构相互作用的计算模型之后，该技术可突破传统分析方法的局限，实现对基础工作状态的精细化预测。当前主流的数值分析方法包括适用于连续介质及复杂边界的有限元法、擅长求解大变形问题的有限差分法，以及针对节理岩体等不连续介质的离散元法。根据具体工程地质条件与分析目标选择恰当的数值平台，是确保分析结果可靠性的前提。

数值模拟的关键技术在于准确刻画土-结构相互作用的复杂力学行为，这包括选用合理的本构模型来描述土体的非线性应力-应变关系，如能反映应力路径影响的硬化土模型和能模拟小应变下高刚度特性的小应变刚度模型。针对特定工程问题，需进行专项分析：在地震区，应进行动力相互作用分析，以评估地基液化、基础惯性响应等问题；在地下水位变化显著的场地，则需采用流固耦合分析，模拟渗流与应力场的相互影响，从而更真实地预测基坑降水、边坡稳定性及基础抗浮等工况。

数值模拟结果的可靠性高度依赖输入参数的准确性。鉴于岩土参数固有的空间变异性和平不确定性，纯粹的确定性分析存在局限<sup>[3]</sup>。因此，必须在模拟中融入不确定分析思想，利用参数敏感性分析来识别对输出结果影响最大的关键参数，从而指导现场勘察与试验工作聚焦重点；并通过概率分析来量化基础系统的失效概率，为设计决策提供风险参考。

## 3 稳定性评估方法

### 3.1 多层次评估体系

#### 3.1.1 极限状态设计

极限状态设计方法是现代基础工程稳定性定量评估的核心，分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。承载能力极限状态关注基础的安全性，包括地基失稳、基础结构破坏等；正常使用极限状态关注基础的适用性，包括沉降、水平位移和振动等。在复杂地质条件下，基础设计应同时满足两类极限状态的要求，确保基础在设计使用期内安全适用。

#### 3.1.2 稳定性分析

稳定性分析考虑了多种荷载组合和工况，包括持久工况、短暂工况和偶然工况。持久工况对应正常使用状态；短暂工况对应施工期间或临时检修状态；偶然工况对应地震、洪水等罕见事件。对于不同工况，应采用不同的安全标准和控制指标。譬如，对于地震工况，允许基础进入有限度的塑性状态，但应保证整体稳定性；对于正常使用工况，则要严格控制变形和裂缝宽度。

### 3.1.3 长期性能评估

复杂地质条件下基础稳定性评估还需考虑时间效应，特别是与土体蠕变、固结和化学变化相关的长期性能。软土地基上的基础，工后沉降可能持续数年甚至数十年，长期稳定性评估要预测最终沉降和发展趋势；岩溶地区的基础，需评估地下水波动对溶洞顶板稳定性的长期影响；腐蚀性环境中的基础结构，得评估材料性能退化和耐久性损失对长期稳定性的影响。

## 3.2 现场监测与数据分析

现场监测是复杂地质条件下基础稳定性评估的重要手段，其通过实时数据采集和分析反馈验证设计假设，监控施工安全，评估使用性能。基础工程监测内容包括变形监测、应力监测、地下水位监测和振动监测等，形成多参数监测系统。监测点布置应考虑地质条件变化和基础受力特点，确保监测数据具有代表性。值得一提的是，自动化监测技术的发展极大提升了基础稳定性检测的效率和精度。自动化监测系统能够实时采集和传输数据，及时发现异常情况，预测潜在风险，为工程决策提供可靠依据。

监测数据的分析与反馈是现场监测工作的核心价值所在。对监测数据进行即时分析和解读，可以评估基础的实际工作状态，判断是否与设计预期一致。当监测数据出现异常时，要分析原因并采取相应措施。监测数据还是验证和完善数值模型的重要依据，进行反分析可以修正模型参数<sup>[4]</sup>，提高预测精度。最后，基于监测数据的预警系统是基础稳定性评估的重要应用，可设定多级预警阈值，以此实现风险分级管理。预警阈值通常分为正常、注意和警戒三个等级，对应不同的响应措施。当监测数据超过注意阈值时，就应该加强监测频率和分析研究；当超过警戒阈值时，必须启动应急预案，采取工程措施控制风险。

## 3.3 风险评估与决策支持

复杂地质条件下基础稳定性评估本质上是一个不确定性决策过程，涉及多种不确定因素，如地质条件不确定性、参数不确定性、模型不确定性和荷载不确定性等。风险评估为处理这些不确定性提供了系统框架，其以量化分析的方式基础失效的可能性和后果，支持风险管理决策。基础稳定性风险评估包括危险识别、概率分析和后果评价三个步骤。危险识别旨在找出可能导致基础失效的潜在危险源；概率分析评估各种危险导致基础失效的可能性；后果评价则分析基础失效可能造成的人

员伤亡、经济损失和社会影响。综合概率和后果分析，可以评估基础失效风险水平，判断风险是否可接受。

基于风险评估的决策支持系统能够帮助工程人员在多种设计方案和措施中选择最优方案，平衡安全性与经济性。对于风险较高的复杂地质条件，可采取风险降低措施，如加强勘察、优化设计、强化监测或增加冗余度等；对于风险较低的场地，则可选择更为经济的方案。风险评估还可用于确定设计和施工的重点关注领域，合理分配资源，提高工程管理的效率和效果。复杂地质条件下基础稳定性风险评估需考虑多种失效模式及其相关性，常见的失效模式包括承载力不足、过度沉降、差异沉降、滑移失稳和液化失效等<sup>[5]</sup>。各种失效模式可能存在相关性，如地震作用同时引起地基液化和滑移失稳。因此，要想确保评估系统的可靠性，就应该考虑多种失效模式的组合效应，采用系统可靠性分析方法，如故障树分析或事件树分析，全面评估基础系统的风险水平。

## 4 结束语

复杂地质条件下房屋建筑工程基础结构设计与稳定性评估是一个系统性、多学科的复杂工程问题，涉及地质工程、岩土工程、结构工程和信息技术等多个领域的知识和技术。本文系统分析了复杂地质条件对基础设计的影响，总结了基础设计的关键技术，提出了稳定性评估的方法体系，可以为相关工程实践提供理论指导和技术参考。随着岩土工程理论、数值分析技术和监测技术的不断发展，复杂地质条件下基础工程设计与稳定性评估将向着更加精确化、系统化和智能化的方向发展。然而，复杂地质条件的多样性和特殊性决定了每个工程都具有一定的独特性，实际工程中还需根据具体条件进行具体分析，在理论指导下结合工程经验，做出合理的设计决策。

## 参考文献

- [1] 曹晓婧. 复杂地质条件下现代建筑结构地基处理技术及材料研究[J]. 住宅与房地产, 2024(29): 89–91.
- [2] 詹文文. 复杂地质条件下基坑支护结构设计及数值模拟研究[J]. 江西建材, 2024(3): 173–174.
- [3] 耿雪峰, 徐星. 复杂地质条件下的高支挡结构设计与施工探讨[J]. 土工基础, 2023, 37(5): 746–752.
- [4] 徐翩翩. 复杂地质条件下建筑结构设计方法研究[J]. 现代工程科技, 2024, 3(22): 20–23.
- [5] 李航. 基于复杂地质条件的建筑结构设计挑战与应对[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(2): 147–149.