

复杂地质条件下工业建筑结构设计

胡 林

中煤科工集团北京华宇工程有限公司 北京 100120

摘要：复杂地质条件是工业建筑设计需突破的关键瓶颈，关乎工程安全与效益。本文系统剖析典型复杂地质类型及工程特征，阐述其对工业建筑结构稳定性、施工难度等多方面影响。从前期勘察与风险评估切入，构建精准勘察技术体系与科学评估法，明确协同要点。重点探讨核心设计技术，为复杂地质区工业建筑设计提供支撑。研究表明，针对性举措可化解风险，平衡安全与经济，推动此类区域工业建设发展。

关键词：复杂地质；工业建筑；结构设计

引言：在工业建设蓬勃发展的当下，复杂地质条件成为工业建筑结构设计面临的关键挑战。其类型多样、工程风险多元，对工业建筑的地基承载、结构抗震等方面影响显著，还增加了工程成本与施工难度。如何突破这一瓶颈，实现工业建筑在复杂地质条件下的安全可靠与经济合理，成为亟待解决的问题。本文将深入剖析复杂地质条件，探讨工业建筑结构设计核心技术，为相关工程提供参考。

1 复杂地质条件的分类与工程特征分析

1.1 典型复杂地质类型

复杂地质是指地质条件对工程建设存在显著制约的各类地质形态，主要可分为软弱地基类、特殊岩土地质类及灾害性地质类三大典型类型。软弱地基类以软土、淤泥质土、泥炭土为代表，广泛分布于沿海滩涂、河流冲积平原等区域，具有天然含水量高、孔隙比大的物理特性。特殊岩土地质涵盖岩溶、冻土、红黏土等，其中岩溶地质以地下溶洞、溶沟发育为特征，冻土则随温度变化呈现冻胀融沉特性。灾害性地质包括滑坡、崩塌、砂土液化等，多受地形、水文及地震活动等因素诱发。不同类型复杂地质在空间分布、物质组成上存在显著差异，但其共同特征是对工程建设的适应性差，需针对性开展设计与处理。

1.2 复杂地质的核心工程风险

复杂地质带来的核心工程风险呈现多元化与连锁性特征，贯穿工程建设全周期。从地基层面看，软弱地基的高压缩性易导致地基不均匀沉降，使结构产生附加应力，引发墙体开裂、构件变形。岩溶地质中未探明的溶洞可能导致基础突然失稳，形成安全隐患。灾害性地质的风险更具突发性，滑坡体的滑动会直接推动建筑结构位移，砂土液化在地震作用下则会使地基承载力急剧下降。同时，复杂地质的隐蔽性增加了风险预判难度，部

分地质问题在施工阶段才暴露，易导致施工中断^[1]。另外，地质条件的复杂性还可能引发连锁风险，如地基沉降导致上部结构刚度失衡，进而降低结构抗地震能力。

1.3 工业建筑对复杂地质的特殊需求

工业建筑因功能特殊，对复杂地质的适配需求高于民用建筑。其常承载重型设备、物料仓储等荷载，部分车间还有大跨度、高空间要求，故对地基承载力稳定性要求极高，地质需长期支撑集中荷载且沉降不过量。部分工业生产有高温、振动等工况，如冶金车间高温影响冻土稳定性，机械加工车间振动加剧软弱地基沉降，地质需有良好抗干扰能力。此外，工业生产连续性高，地质条件要保障建筑长期稳定，适配性需兼顾短期安全与长期运维。

2 复杂地质条件对工业建筑的影响

2.1 地基承载力不足导致建筑物沉降、倾斜

复杂地质中软弱地基、岩溶发育区等常见类型的核心问题是地基承载力不足，直接引发工业建筑沉降与倾斜。软弱地基的土体颗粒细小、黏聚力低，无法有效承担工业建筑的重型设备荷载与结构自重，在荷载作用下会发生持续压缩变形，形成均匀或不均匀沉降。当沉降量超过结构允许值时，会导致车间地面开裂、设备基础位移，影响生产设备的安装精度与运行稳定性。岩溶地质中，若溶洞未被有效填充或跨越，基础荷载作用于溶洞上方时，易引发局部地基塌陷，导致建筑出现倾斜。

2.2 地震作用下结构破坏严重

复杂地质条件会显著放大地震作用对工业建筑的破坏效应，降低结构抗震性能。砂土液化地质在地震剪切波作用下，砂土颗粒间的孔隙水压力急剧升高，土体抗剪强度瞬间丧失，地基失去承载能力，导致上部结构发生整体失稳或垮塌。岩溶地质区域的岩层完整性差，地震波传播过程中易产生反射与放大，使结构承受额外振

动荷载,加剧构件破坏。软土地基的柔性特征会延长结构自振周期,与地震动周期产生共振效应,导致结构变形加剧^[2]。

2.3 地质灾害引发建筑物损坏甚至倒塌

滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害对工业建筑具有毁灭性影响,易造成建筑物损坏甚至整体倒塌。滑坡区域的工业建筑,会因滑坡体的缓慢滑动或突发滑动受到水平推力,导致基础被推移、墙体开裂,当推力超过结构抗剪能力时,建筑会随滑坡体一同移动并垮塌。崩塌地质多发生于山区工业场地,坠落的岩块会直接撞击建筑结构,造成局部构件破坏,若撞击核心承重构件,会引发连锁反应导致整体倒塌。

2.4 增加工程成本和施工难度

复杂地质条件通过增加施工工序与技术难度,直接导致工业建筑工程成本上升。在勘察阶段,需采用地质雷达、钻孔CT等高精度勘察技术,勘察周期较常规地质延长30%~50%,勘察费用显著增加。施工阶段,软弱地基需进行换填、夯实或复合地基处理,岩溶地质需开展溶洞填充、桩基穿越等专项施工,这些额外工序不仅增加材料与人工成本,还延长施工周期。某重型机械厂因场地存在深厚软土,采用CFG桩复合地基处理技术,仅地基处理成本就占工程总造价的22%,较常规地基施工成本增加近百万元。同时,复杂地质易引发施工安全问题,需投入更多安全防护措施,进一步推高工程成本,给项目投资控制带来挑战。

3 复杂地质条件下的前期勘察与风险评估

3.1 精准勘察技术体系构建

针对复杂地质的隐蔽性与复杂性,需构建“宏观普查+微观探测+动态监测”的精准勘察技术体系。宏观普查阶段采用遥感技术、地质测绘等手段,明确区域地质分布规律与宏观灾害隐患,划定重点勘察区域。微观探测阶段结合钻孔勘探、地质雷达、声波透射法等技术,精准获取岩土体物理力学参数,查明地下溶洞、软弱夹层等隐蔽地质构造的位置与规模。对于动态变化的地质条件,如冻土、滑坡体,需设置长期监测点,实时采集沉降、位移等数据^[3]。同时,引入数据融合技术,整合不同勘察手段的成果,消除单一技术的探测盲区,形成完整的地质信息数据库,为后续设计提供精准数据支撑,避免因勘察偏差导致设计失误。

3.2 地质风险评估方法

复杂地质风险评估需采用定性与定量相结合的方法,实现风险等级的精准划分。定性评估阶段,结合地质勘察成果,分析各类地质问题的成因、发展趋势及对

建筑结构的影响方式,识别核心风险源。定量评估阶段运用数值模拟、层次分析法等手段,将地质参数、结构荷载等因素量化,计算风险发生概率与损失程度。例如,采用有限元软件模拟软土地基的沉降量,结合工业建筑的允许沉降标准,评估沉降风险等级;针对滑坡地质,通过计算滑坡推力与结构抗滑能力的比值,确定滑坡风险等级。最终根据评估结果,将地质风险划分为高、中、低三个等级,为设计方案的优化与风险防控措施的制定提供依据。

3.3 勘察与设计的协同衔接

勘察与设计的协同衔接是化解复杂地质风险的关键环节,需建立“勘察数据实时反馈、设计方案动态调整”的协同机制。勘察过程中,发现重大地质异常时,如大型溶洞、突发软弱夹层,需第一时间与设计团队沟通,共同分析地质条件对结构设计的影响。设计阶段,设计人员需深度参与勘察方案制定,明确设计对勘察数据的精度要求与重点关注内容。基于勘察形成的地质信息模型,与结构设计模型进行融合,开展可视化协同分析,预判结构与地质的适配问题^[4]。同时,建立协同工作平台,实现勘察与设计数据的共享与同步更新,避免因信息传递滞后导致设计与实际地质条件脱节,确保设计方案的针对性与可行性。

4 复杂地质条件下工业建筑结构设计核心技术

4.1 地基处理与基础设计技术

针对复杂地质的地基问题,需采用“因地制宜”的地基处理与基础设计技术。对于软弱地基,根据沉降要求与荷载大小,选择换填法、强夯法或复合地基法进行处理,如采用CFG桩与褥垫层组合形式,提高地基承载力并控制沉降。岩溶地质区域,采用桩基穿越技术,使桩端落在完整岩层上,同时对桩周溶洞进行填充处理,确保桩基受力稳定。对于冻土地质,采用换填非冻胀土、设置保温层等措施,减少冻胀融沉对基础的影响。基础选型上,重型工业建筑优先采用桩基础、箱型基础等刚性基础形式,增强基础抗变形能力;对于大跨厂房,可采用联合基础减少基础个数,提高地基受力均匀性,从根本上解决地基承载力不足问题。

4.2 上部结构设计与选型优化

复杂地质条件下,工业建筑上部结构设计需突破“刚性对抗”的传统思路,以“增强刚度、优化受力、适应变形”为核心进行系统性选型优化,实现结构与地质条件的动态适配。结构体系选型是首要环节,需综合考量地质变形特性与建筑功能需求:对于软土、岩溶等易产生不均匀沉降的区域,优先选用钢结构、钢混组合

结构等自重轻、延性好的体系，钢结构自重仅为混凝土结构的1/3~1/2，可显著降低地基荷载，其良好的延性还能吸收地质变形产生的附加应力；化工、制药等有防腐需求的厂房，可采用耐候钢与混凝土组合结构，兼顾抗变形能力与耐久性。针对大跨度工业车间，如飞机装配厂房、重型机械车间，门式刚架与网架结构是最优选择，门式刚架通过合理设置斜撑与系杆，形成高效的受力体系，跨度可达30米以上；网架结构则通过三维空间节点将杆件连接成整体，受力均匀且抗震性能优异，适用于跨度超过60米的超大空间场景，两种结构均能通过精确的杆件截面计算，降低局部应力集中风险。结构刚度优化需兼顾整体稳定性与局部适应性，在厂房纵向设置刚性系杆连接柱顶，横向加强柱间支撑与屋面水平支撑，形成完整的空间抗侧力体系，提升结构抵御地震作用与地质滑坡产生水平力的能力，使结构层间位移角控制在1/250以内^[5]。同时，必须在结构与地质变形的协调部位设置柔性连接节点，如厂房主体与重型设备基础的连接处，采用橡胶隔震垫与滑动支座组合形式，允许沿水平与竖向产生5~10mm的变形量，避免设备振动与地基沉降通过刚性连接传递至主体结构；在厂房伸缩缝与沉降缝位置，采用可伸缩的密封胶条与滑动盖板，既满足变形需求又保证厂房的密闭性，防止粉尘、雨水渗入。通过这种“刚柔并济”的设计策略，实现上部结构对复杂地质变形的主动适应，避免结构因强制约束产生开裂破坏。

4.3 结构与地质的协同防护技术

结构与地质的协同防护技术打破“地质处理”与“结构设计”的割裂，以“主动防控+被动抵抗”策略，构建覆盖地质灾害全环节的防护体系。主动防控聚焦源头治理，降低灾害发生概率与强度。在滑坡区域，采用“抗滑桩+挡土墙+排水系统”方案。抗滑桩间距依滑坡推力计算确定，桩身嵌入稳定岩层深度不少于桩长的1/3；挡土墙用衡重式结构增强抗倾覆力；设置截水沟与盲沟排除地下水，减少对土体抗剪强度的削弱。砂土液化区用振冲碎石桩与挤密砂桩组合处理，碎石桩间距1.5~2.0米，形成复合地基，提高砂土密实度至0.85以上，

提升抗液化能力。岩溶塌陷风险区在基础外侧设注浆帷幕，采用水泥-水玻璃双液注浆，形成厚度不小于2米的固化层，阻止溶洞发育；被动抵抗通过结构优化增强抗灾能力。地震高发区工业建筑在基础与主体结构间设铅芯橡胶隔震支座，可吸收80%以上地震能量，使传递至上部结构的地震力降低50%~70%；框架柱节点处采用外包钢加固，提高节点抗剪承载力。岩溶与软土叠加区域建筑，设置由沉降观测点、数据采集仪与预警系统组成的实时监测网络，观测点间距不超20米，沉降速率超0.1mm/d自动预警，以便及时加固；针对复合复杂地质，采用多技术融合方案。软土地震区先以CFG桩处理地基提高承载力，再在基础底部设隔震层，加强上部结构梁柱节点强度。岩溶滑坡区将抗滑桩与桩基结合，抗滑桩承受水平滑坡推力，工程桩承担竖向荷载，形成“双向防护”体系。通过主动防控切断灾害源头，被动抵抗提升结构韧性，实现协同防护，降低复杂地质工程风险。

结束语

复杂地质条件虽给工业建筑设计带来挑战，但其影响可控。通过系统分析地质情况，构建精准勘察与科学评估体系，运用地基处理等核心技术，能化解地质风险。勘察与设计紧密协同、强化风险意识是保障工程安全的关键。未来，随着勘察精准化、设计智能化，此类结构设计将更科学高效，相关经验可为同类工程提供参考，推动工业建筑安全建设与可持续发展。

参考文献

- [1] 杨坤,张汉龙.某复杂岩溶地区的地基基础设计[J].广东工业与建筑, 2021, 28(10):49-53,57.
- [2] 徐萌.坡地住宅建筑设计实践[J].福建建设科技,2022,(05):24-26+38.
- [3] 张瑜.住宅建筑设计与抗震性分析[J].居舍,2022,(22):93-95+162.
- [4] 黄嘉琦.复杂地质条件下井架基础施工技术[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(17):170-172.
- [5] 于兴凯.坑透技术在煤矿复杂地质条件下的应用[J].能源与节能, 2024(09): 272-274+303.