

复杂地质条件下地基基础施工质量管控体系构建与应用

吴扬进

320621*****4117

摘要: 随着我国基础设施建设的纵深发展,工程项目日益向地质条件复杂的山区、沿海、喀斯特地貌区及城市更新区域延伸。复杂多变的地质环境,如软弱土层、岩溶、断层破碎带、高边坡、地下水富集等,对地基基础工程的施工质量与安全构成了严峻挑战。传统依赖经验、分散片段化的质量管理模式已难以满足现代工程高标准、低风险的需求。因此,构建一套系统化、科学化、动态化的地基基础施工质量管控体系,并将其有效应用于工程实践,具有重大的理论与现实意义。本文首先系统分析了复杂地质条件的主要类型及其对地基基础施工带来的核心质量风险;在此基础上,创新性地构建了一个以“全生命周期管理”为理念,涵盖“事前预控、事中程控、事后验控”三大阶段,并深度融合地质勘察、设计优化、施工技术、监测反馈与信息管理五大核心模块的集成化管控体系模型。进而,通过结合典型工程案例,深入阐述了该体系在具体项目中的应用路径、关键控制要点及实施成效。最后,对体系未来的智能化、标准化发展方向进行了展望。本文的研究旨在为复杂地质条件下的地基基础工程质量管理提供一套可复制、可推广的理论框架与实践指南。

关键词: 复杂地质;地基基础;质量管控体系;全生命周期;风险预控;信息集成

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.042

引言

地基基础是构筑物的根本,其质量直接决定了上部结构的安全、稳定与耐久性,素有“百年大计,基础为先”之说。在复杂地质条件下,这一“根本”的打造过程充满了不确定性和高风险性。地质条件的隐蔽性、多变性和区域性,使得地基基础施工往往成为整个工程项目的技术难点、质量管控焦点与工期成本控制关键点。

当前,尽管我国在地基处理与基础施工技术方面取得了长足进步,但在质量管理的系统性与协同性上仍存在不足。常见问题表现为:地质勘察精度与设计、施工需求脱节;施工方案对地质突变适应性差;质量控制点设置粗放,过分依赖关键节点验收而忽视过程连续性控制;监测数据与施工决策联动滞后;各参与方(勘察、设计、施工、监理)信息孤岛现象严重,质量责任难以追溯。这些问题的根源在于缺乏一个贯穿工程项目始终、整合多方资源、能够动态响应地质信息变化的整体性管控体系。

因此,本文立足于工程系统管理理论、全面质量管理(TQM)思想及风险管理理念,致力于构建一个适用于复杂地质条件的、主动预防与动态控制相结合的地基基础施工质量管控体系。该体系的构建与应用,旨在将零散的管理活动系统化,将被动的问题处理转化为主动的风险防控,将经验决策提升为数据驱动决策,从而实现地基基础工程质量的本质安全与可靠提升。

1 复杂地质条件对地基基础施工的主要质量风

险分析

构建针对性管控体系的前提是精准识别风险源。复杂地质条件并非单一概念,而是多种不良地质现象的集合,每种现象都引致特定的质量风险。

1.1 不良地基土体带来的风险

软弱土层(如淤泥、淤泥质土)承载力低、压缩性高、流变性,易导致基础沉降过大、不均匀沉降乃至整体失稳。湿陷性黄土遇水强度骤降,引发突发性沉降。膨胀土含水率变化产生剧烈胀缩,造成基础开裂上拱。这些土体问题要求施工中必须精确控制地基处理效果、降水深度及荷载施加速率。

1.2 岩溶与土洞带来的风险

在碳酸盐岩地区,隐伏的溶洞、土洞是重大安全隐患。施工中可能发生突然塌陷、钻(冲)孔桩漏浆、掉钻,导致桩身质量缺陷、机械设备损毁甚至人员伤亡。其风险管控核心在于超前精准探明洞穴空间分布,并采取有效的充填、跨越或结构加强措施。

1.3 断裂破碎带与不均匀岩体带来的风险

断层破碎带岩体极为破碎,强度低,自稳能力差,且常为地下水通道。桩基施工易出现塌孔、偏斜,隧道基坑开挖易引发涌水、突泥和围岩大变形。岩面陡倾、软硬互层导致桩端持力层判断困难,易产生桩长差异过大、承载力离散等问题。

1.4 地下水带来的风险

高水位、承压水、腐蚀性地下水是常见风险源。深基坑开挖中的管涌、流砂、坑底突涌风险极高。地下水控制不当会影响土方开挖、支护结构安全及混凝土浇筑质量（如桩身夹泥、离析）。腐蚀性地下水则对基础结构的耐久性构成长期威胁。

1.5 复杂地形与高边坡带来的风险

山区建设中，斜坡上的基础施工面临边坡稳定性问题。开挖扰动可能诱发滑坡、崩塌，影响在建基础及相邻构筑物安全。同时，地形高差导致施工条件恶劣，大型设备部署困难，材料运输不便，间接增加了质量控制难度。

上述风险往往交织共存，呈现出复杂性、耦合性与动态性。单一的技术措施或孤立的管理环节无法有效应对，必须依靠系统性的管控体系进行综合治理。

2 复杂地质条件下地基基础施工质量管控体系的构建

基于全生命周期管理理念，本文构建的质量管控体系模型如图1（概念图，此处以文字描述）所示。该体系是一个以“地质信息”为主线，以“动态闭环控制”为机制，贯穿勘察、设计、施工、监测全过程的集成系统。

2.1 核心理念：全生命周期与动态闭环控制

体系强调从项目前期的地质勘察开始，直至基础工程竣工验收的全过程质量控制。它打破阶段壁垒，要求后续阶段不断反馈信息至前期，形成“勘察指导设计、设计与施工互动、施工验证并反哺勘察设计”的螺旋式上升的优化循环。其核心控制机制是“PDCA-S”（计划-执行-检查-处置-共享）动态闭环：基于地质信息制定计划（P），严格执行并调整工艺（D），通过多层次检查与监测进行验证（C），对偏差和问题及时处置并优化方案（A），并将全过程数据与经验知识进行标准化归档与共享（S），为后续工程提供参考。

2.2 体系构成：三大阶段与五大模块集成

体系主体由三大控制阶段和五大功能模块纵横交织构成。

第一阶段：事前预控——地质风险精细化识别与方案前瞻性设计，此阶段是体系成败的基石，目标是“先知先觉”。

精细化、立体化地质勘察模块：超越传统勘察规范的最低要求，采用“宏观调查+精细化勘探+专项测试”组合模式。综合利用遥感（RS）、地理信息系统（GIS）、工程物探（如高密度电法、地震CT）、钻探与原位测

试（如CPTU孔压静力触探）等手段，构建三维地质模型。勘察深度和密度必须满足施工工法选择、风险判识的需要，特别关注不良地质体的空间定位与性状描述。

动态化、协同化设计优化模块：设计不应是静态的图纸，而应是基于地质模型的动态优化过程。推广“勘察-设计一体化”模式，鼓励采用信息化设计工具。设计方案（如桩型、持力层选择、地基处理方法）应具备多套预案，明确地质条件变化时的设计参数调整原则和阈值，为施工阶段的动态变更更多预留空间。

第二阶段：事中程控——施工过程动态适配与实时反馈纠偏，此阶段是体系运行的核心，目标是“动态适配”。

智能化、标准化施工技术管理模块：编制专项施工方案并组织专家论证。关键工艺（如钻孔灌注桩的成孔、清孔、水下混凝土灌注；深层搅拌桩的喷浆量与提升速度；基坑开挖与支护）推行标准化作业流程（SOP）。引入智能化施工设备，如可实时监测钻孔垂直度、深度的智能旋挖钻机，自动控制配比与喷浆量的搅拌桩设备，实现工艺参数的可控、可测。

多层次、即时化质量监测与检测模块：建立“施工自检、监理旁站、第三方监测、业主巡查”四层级监控网络。监测内容从传统的位移、沉降，扩展到应力、应变、地下水、振动等多参数。采用自动化监测传感器与物联网（IoT）技术，实现数据实时采集、无线传输。引入过程检测手段，如桩基的成孔质量检测仪、超声波跨孔透射法（CT）用于验证桩身完整性，实现从“事后验尸”到“过程体检”的转变。

第三阶段：事后验控——质量溯源与知识沉淀，此阶段是体系闭环和提升的关键，目标是“溯源固本”。

信息化、集成化数据管理平台模块：这是串联整个体系的“数字神经系统”。构建基于建筑信息模型（BIM）与地理信息系统（GIS）融合的协同管理平台（BIM+GIS）。该平台集成三维地质模型、设计模型、施工进度、监测数据、检测报告、工序验收记录等信息。实现质量问题的快速溯源（如某根桩的质量问题可追溯到其成孔记录、混凝土浇筑记录及该位置的地层信息），辅助进行竣工后评估，并为运维阶段提供完整的基础数据档案。

2.3 体系运行的保障机制

体系的落地需要强有力的保障：组织保障上，成立以项目总工程师为核心，涵盖勘察、设计、施工、监理、监测单位技术负责人的联合质量控制小组；制度保障上，制定详细的质量责任追溯制度、信息沟通联席会议制度及应急预案；技术保障上，确保在勘察、监测、信息化

方面的投入，并加强人员培训。

3 管控体系在典型工程中的应用实践

以某位于西南丘陵区、跨越岩溶发育带和软弱土层的跨江大桥锚碇基础工程为例，阐述本体系的应用。

3.1 工程地质难点

锚碇基础尺寸巨大，承受巨大水平拉力。场区上覆厚层软塑状黏土，下伏基岩为石灰岩，岩溶中等-强烈发育，溶洞大小、位置无规律，且存在裂隙承压水。主要风险：基坑开挖的深层稳定性、承压水突涌、桩基施工中的漏浆塌孔、桩端落在溶洞顶板导致的承载力不足。

3.2 管控体系的应用实施

事前预控：采用“无人机航测+高密度电法+超前钻探”进行精细化勘察，确定了主要溶洞群和断裂带位置，构建了高精度三维岩溶地质模型。设计上，采用“大直径桩柱+复合地基+帷幕注浆”的综合方案，并明确：钻孔遇溶洞时，根据其大小和填充情况，采取投掷片石黏土回填、混凝土灌注或钢护筒跟进等不同预案。

事中控控：

施工技术管理：对所有桩基实行“一桩一策”管理。每根桩开钻前，调阅其三维地质剖面进行技术交底。采用智能旋挖钻机，实时监控钻压、转速、垂直度。遭遇地质异常时，立即启动预案，由现场联合质量控制小组决策。

质量监测与检测：基坑周边布置自动化沉降、位移、水位监测点，数据每2小时上传一次平台。每根桩均进行成孔质量检测和超声波透射法检测。在关键桩位，采用钻孔电视对桩端岩层和溶洞处理情况进行直观验证。

事后验控与信息集成：所有地质资料、设计变更、施工记录、监测数据、检测报告均录入BIM+GIS管理平台。通过平台，可任意查询任一根桩的“身份档案”，实现了质量的全程可追溯。项目结束后，形成了该区域岩溶处理的技术工法库和知识库，为类似工程提供了宝贵经验。

3.3 应用成效

通过该体系的系统应用，项目成功克服了复杂地质挑战：基坑安全稳定，桩基一次验收合格率达到99.8%，无一例重大质量安全事故。相比传统管理方式，虽然前期勘察和技术投入增加约15%，但避免了因地质问题导致的重大方案变更、工期延误和事故处理成本，整体工

期缩短10%，总成本得到有效控制，实现了质量、安全、进度、成本的综合最优。

4 结论与展望

本文针对复杂地质条件下地基基础施工的质量管理难题，构建了一个以全生命周期管理为理念、以动态闭环控制为机制、集成三大阶段与五大模块的系统化质量管控体系。该体系的核心价值在于：

变被动为主动：通过精细化勘察和前瞻性设计，将质量管控关口前移，实现风险预控。

变孤立为协同：打破各环节信息壁垒，促进勘察、设计、施工、监测的深度融合与协同工作。

变粗放为精细：依托信息化、智能化技术，实现施工过程的量化管理和质量问题的精准溯源。

变经验为科学：建立以实时数据为驱动的决策机制，提升质量管理的科学化水平。

实践证明，该体系能有效提升复杂地质条件下地基基础工程的施工质量可靠性、安全性与经济性。

未来，随着技术的发展，该体系将进一步向智能化、无人化、标准化方向演进：人工智能（AI）和机器学习（ML）将用于地质模型的自动解译、施工风险的智能预测与报警；无人机、机器人将更多应用于勘察、监测和危险工序施工；基于大量项目实践数据的积累，将逐步形成针对不同复杂地质类型的标准化质量管控流程和知识库，推动行业整体管理水平的跃升。最终，构建一个“地质可透视、过程可感知、风险可预控、质量可追溯”的智慧地基基础工程质量管理新生态。

参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用（第三版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.
- [2] 刘国彬，王卫东. 基坑工程手册（第三版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2022.
- [3] 张炜，李镜培. 基于BIM与GIS的岩土工程协同设计与施工管理研究[J]. 岩土力学，2021，42(S1)：1-10.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础工程施工质量验收标准 GB50202-2018[S]. 北京：中国计划出版社，2018.

作者简介：吴扬进（1982.01-），男，汉族，江苏南通，本科，高级工程师，研究方向：建筑工程地基基础施工管理。