 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10645

Optimization of Highway Bridge Foundation Design and Load-bearing Characteristic Analysis under Complex Geological Conditions

Ji'an Zhou

Overseas Engineering Branch of China Railway Fifth Bureau Group, Guiyang, Guizhou, 550003, China

Abstract

Highway bridge foundations serve as critical components for structural force transfer and overall stability, with their design rationality directly impacting engineering safety, durability, and cost-effectiveness. In complex geological environments such as mountainous areas, river valleys, soft foundations, karst formations, and high groundwater levels, foundations face multiple challenges including uneven soil layers, discrete geotechnical parameters, localized adverse geological conditions, erosion, slip, differential settlement, and prolonged environmental influences, significantly increasing design complexity. This study analyzes the effects of different geological conditions on foundation load-bearing characteristics and deformation patterns, explores key considerations in foundation type selection, parameter optimization, force analysis, and construction adaptability control, and proposes optimization pathways for load-bearing performance. The research emphasizes that foundation design under complex geological conditions requires meticulous investigation, stratum identification, structure-soil interaction analysis, and comprehensive risk management throughout the process. Establishing a design system that balances adaptability and reliability is essential to achieve coordinated safety, economic efficiency, and durability performance in bridge foundations.

Keywords

complex geology; highway bridge; foundation design

复杂地质条件下公路桥梁基础设计优化与承载特性分析

周冀安

中铁五局集团海外工程分公司，中国·贵州 贵阳 550003

摘　要

公路桥梁基础是结构受力传递和整体稳定的关键，其设计合理性直接关系工程安全、耐久性和经济性。在山区、河谷、软弱地基、岩溶发育及高地下水位等复杂地质条件下，基础面临土层不均、岩土参数离散、局部不良地质及冲刷、滑移、沉降差异和长期环境作用等多重挑战，设计难度显著增加。文章分析不同地质环境对基础承载特性和变形规律的影响，探讨类型选择、参数优化、受力分析及施工适应性控制要点，并提出承载特性优化路径。研究指出，复杂地质条件下基础设计需依托精细勘察、地层识别、结构—地基协同分析及全过程风险控制，建立适应性和可靠性兼具的设计体系，实现桥梁基础安全、经济与耐久性能的协调统一。

关键词

复杂地质；公路桥梁；基础设计

1 引言

随着公路桥梁建设不断延伸至山区峡谷、深厚覆盖层、岩溶发育及河流冲积平原等复杂地质区域，基础工程面临的地质条件愈加多样化。桥梁上部荷载通过基础传递至地基，其受力状态和性能不仅取决于基础型式，还与岩土层分布、地下水条件、不良地质作用及施工扰动密切相关。传统基础设计多假设地层均匀、参数稳定，但在复杂地质环境下这一假设难以成立。若地质认识不足、基础选型不当或受力分析简化过度，易导致沉降超限、基础倾斜、承载失稳及后期病害，直接影响桥梁运营安全。因此，针对复杂地质条件开展公路桥梁基础设计优化与承载特性研究，有助于提升设计精度，为风险识别、参数控制和方案比选提供理论支持与实践参考。

2 复杂地质条件下公路桥梁基础设计的工程特点

2.1 地质条件的不均一性显著增加基础设计难度

复杂地质条件最突出的特征在于地层分布的不连续性

【作者简介】周冀安（1982–），男，中国河北正定人，本科，高级工程师，从事路桥方向研究。

和工程性质的不均一性。桥址区域可能在短距离范围内出现软弱夹层、孤石、漂石层、强风化与微风化岩体交替分布，甚至伴有断裂破碎带、溶洞、采空区和古河道回填层等异常地质体。这种地层变化使桥梁基础受力边界条件更加复杂，也使传统依靠少量钻孔资料进行地层外推的方式面临较大不确定性。对公路桥梁基础而言，一旦地层识别偏差较大，基础持力层选择、埋深控制和承载力取值就可能出现系统性误判。由此带来的后果不仅体现在设计安全储备不足，还可能导致施工阶段频繁变更，增加工程投资与工期风险。因此，复杂地质条件下的基础设计必须把地层非均质性作为前提条件加以认识，而不能简单沿用均质场地的设计逻辑。

2.2 不良地质作用对基础稳定的影响更加突出

在复杂地质环境中，桥梁基础往往不仅承受竖向荷载和水平荷载，还要同时面对多种不良地质作用的长期影响。例如，河谷桥址易受水流冲刷和淘刷作用，山区桥址可能受到边坡变形、崩塌落石和地表滑移影响，岩溶区基础则存在洞隙扩展、顶板失稳及地下水渗流冲蚀等风险。对于深厚软土场地，还可能出现长期固结沉降和差异变形问题。这些因素都会改变地基应力分布与基础约束条件，使基础承载机制由单一静载作用转向更复杂的耦合作用状态。也就是说，复杂地质条件下基础设计不再只是一个承载力验算问题，更是一个稳定性、变形控制和环境适应性综合平衡问题。设计若忽视这些长期效应，即便短期承载满足要求，后期仍可能出现结构服务性能下降甚至安全隐患。

2.3 基础设计需兼顾结构受力与施工可实施性

公路桥梁基础设计不仅追求理论上的受力合理，还必须满足施工条件限制与工程组织要求。复杂地质环境下，施工场地往往狭窄，地下水控制困难，钻孔稳定性差，机械设备进入受限，施工扰动对地基性质的影响也更明显。某些基础方案在理论分析中承载性能较优，但在实际施工中可能因成孔困难、清孔质量难以保证、持力层识别模糊或封底处理复杂而难以达到设计预期。反之，一些受力性能稍逊但施工可靠性更高的基础型式，反而更具工程适用性。因此，复杂地质条件下的基础设计必须强调设计与施工一体化思维，把地质风险、施工风险和结构风险放在同一框架下统筹考虑，通过方案比选实现安全性、经济性和可实施性的平衡。

3 复杂地质条件对公路桥梁基础承载特性的影响分析

3.1 地层非均质性改变基础荷载传递路径

在常规地质条件下，桥梁基础荷载可相对清晰地沿基础底面或桩侧、桩端向周围土体和持力层传递，承载机制较为明确。但在复杂地层中，由于不同土层压缩性、强度指标和结构性差异显著，荷载传递路径往往呈现不均匀特征。对于浅基础而言，局部软弱夹层会导致基底应力重新分布，容易产生偏心受压和不均匀沉降；对于桩基础而言，桩侧摩阻力和桩端阻力的发挥程度受各层土体性质影响明显，某些局部硬夹层可能使桩身受力突变，而软弱层则可能削弱桩周约束，降低整体承载效率。若桥墩基础位于地层横向变化强烈区域，不同桩之间受力差异还会进一步加大。由此可见，地层非均质性使基础承载不再表现为理想均匀受力状态，而表现为更强的分层性、局部性和不确定性。

3.2 地下水与冲刷作用削弱基础有效承载能力

地下水条件复杂是影响桥梁基础承载特性的另一个关键因素。高地下水位会降低土体有效应力，改变土层抗剪强度和压缩特性，在砂土、粉土和裂隙发育岩体中尤为明显。对于钻孔灌注桩和承台基础而言，地下水还会影响成孔稳定、沉渣厚度和混凝土灌注质量，从而间接削弱基础实际承载能力。若桥址位于河流、冲沟或洪水频发区域，冲刷作用会进一步降低基础埋置深度和持力层稳定性，使基础暴露于更不利的受力环境。局部冲刷不仅会引起土体流失，还会改变桥墩周边水流形态，导致基础侧向支撑减弱。基础承载分析若仅以静态地层条件为依据，而忽视地下水波动与冲刷演变过程，往往难以反映其真实服役状态。因此，复杂地质条件下基础承载能力的评估必须将水文地质因素纳入全过程分析。

3.3 不良地质体导致基础变形与破坏模式复杂化

断层破碎带、岩溶空洞、软弱夹层和滑移面等不良地质体，会显著改变桥梁基础的受力和变形特征。以岩溶区为例，若桩端位于溶洞顶板附近，基础承载并不完全取决于桩端持力层强度，还受顶板厚度、洞体规模和覆盖层稳定性的共同控制，局部塌陷可能成为决定性风险。对于滑坡体或高陡边坡附近桥梁基础，地基受力不仅受上部荷载影响，还会受到斜坡体自重应力和位移变形的持续作用，基础破坏模式可能表现为整体倾斜、水平推移或局部剪切失稳。复杂地质体的存在使基础工程不再是简单的竖向承载问题，而演化为多向受力、多场耦合和多因素触发的复合系统。正因如此，对基础承载特性的分析必须突破单一承载力指标评价，转向承载、变形与稳定协同分析。

4 复杂地质条件下公路桥梁基础设计优化路径

4.1 以精细化勘察提升基础设计针对性

基础设计优化的前提是准确把握桥址地质条件。复杂地质环境下，若勘察密度不足、勘探手段单一或资料解释粗略，后续设计优化便缺乏可靠依据。因此，应根据桥梁规模、地质复杂程度和基础重要性，合理提高钻孔布置密度，结合静力触探、波速测试、原位剪切试验、地球物理勘探和水文观测等多种方法，构建更完整的地质认知体系。对岩溶、断裂带、采空区和滑坡体等特殊场地，还应开展专项勘察和补充验证，尽可能识别地层异常和不良地质体空间分布。勘察成果不仅要提供常规物理力学参数，更应揭示地层变化规律、风险分区和工程适应性特征。只有在勘察阶段建立较

高精度的地质模型，基础设计优化才具有真正的针对性和可行性。

4.2 以基础型式比选实现适应性优化

复杂地质条件下，没有一种基础型式能够适用于所有桥址环境，设计优化的关键之一在于基础型式与地质条件的适配。对于浅层持力条件较好且变形控制要求不高的桥位，可优先考虑扩大基础，以降低施工复杂度和工程造价；对于软弱覆盖层较厚、荷载较大或冲刷显著区域，桩基础更具适用性；对于岩层埋深变化大、上覆层不稳定或需穿越不良地层的桥址，可结合嵌岩桩、群桩承台或复合基础方案进行优化[1]。若桥位处于岩溶区、滑坡区或深水急流环境，还需综合考虑抗滑、抗冲、抗倾覆与施工安全等要求。基础型式比选不能仅从承载力角度出发，还应兼顾施工难度、检测可行性、后期维护便利性和环境扰动影响。通过多方案比较，才能在复杂地质条件下找到更合理的设计平衡点。

4.3 以结构—地基协同分析提高设计可靠性

传统基础设计往往将上部结构作用简化为集中荷载，再独立进行基础承载力和沉降验算。这种分析方式在复杂地质环境中容易低估结构与地基之间的相互作用。实际工程中，桥梁墩台刚度、基础刚度和地基变形特征共同决定了内力重分布和基础工作状态。因此，设计优化应加强结构—基础—地基协同分析，通过数值模拟、分层地基模型和非线性接触分析等方法，更真实地反映荷载传递、沉降变形和局部应力集中情况。对于群桩基础，还应重视桩—土—桩相互作用和群桩效应，避免简单按单桩承载力线性叠加。对复杂地质体附近的桥梁基础，则应把边坡稳定、水流冲刷和地下水渗流等因素纳入协同分析框架。只有提升分析模型的真实度，设计优化才能建立在更可靠的力学基础之上。

5 复杂地质条件下基础承载控制与工程保障措施

5.1 加强变形控制与长期服役性能评估

在复杂地质条件下，桥梁基础设计目标不应只停留在极限承载满足要求，更应关注基础在长期服役过程中的沉降、倾斜和耐久性表现。某些场地虽然短期承载力较高，但由于软土固结、地下水变化或不良地质持续演化，后期变形可能逐步累积并影响桥梁线形与结构受力。因此，在基础设计中应加强沉降预测、差异变形分析和长期稳定性评估[2]。对于桥台与桥墩、主桥与引桥之间地层差异较大的情况，还应重点关注不均匀沉降对伸缩装置、支座及上部结构的影响。通过提前识别长期变形风险，可以在设计阶段采取增大基础刚度、优化持力层选择或设置变形协调措施等方式，提高基础服役可靠性。

5.2 加强施工过程控制与地基扰动管理

复杂地质环境下，基础实际工作状态不仅由设计决定，还深受施工过程影响。钻孔偏斜、孔壁坍塌、沉渣超厚、持力层误判、清孔不彻底及混凝土灌注不连续等问题，都可能使基础承载能力与设计值产生明显偏差。尤其在软弱地层、裂隙岩层和高地下水位区域，施工扰动常会改变原有地基结构，使局部强度下降或变形增大。因此，基础工程应把施工质量控制作为设计目标实现的重要保障。对于关键桥位，可通过试桩、静载试验、低应变检测、声测管检测及成孔质量监测等方式验证基础质量，必要时动态调整设计参数和施工工法。只有把施工过程中的不确定性纳入基础承载控制体系，设计优化成果才能真正落地。

5.3 加强监测反馈与动态优化机制建设

复杂地质条件下，桥梁基础工程往往具有较强的不确定性，即便前期勘察和设计较为充分，实际施工中仍可能出现与预判不完全一致的情况。因此，应建立监测反馈与动态优化机制，在施工和运营阶段持续获取基础响应信息，并将其反哺设计和管理决策。施工期间可重点监测孔壁稳定、地下水位、沉降位移和周边边坡变形；运营初期则可继续跟踪墩台沉降、水平位移和冲刷发展情况[3]。通过监测数据与设计分析结果对比，可以更早识别异常趋势，及时采取补强、加固、排水或防冲措施。动态优化机制的价值在于把基础设计从一次性静态成果转变为可修正、可验证、可持续完善的全过程管理体系，这对于复杂地质桥梁工程尤为重要。

6 结语

复杂地质条件下公路桥梁基础设计优化与承载特性分析，是桥梁工程安全建设和长期服役保障中的核心问题。地层非均质性、地下水作用、不良地质体发育及施工环境复杂等因素，使桥梁基础受力路径、承载机制和变形规律表现出更强的不确定性。通过提高地质识别精度、优化基础型式、强化结构—地基共同作用分析，并结合施工质量控制与长期监测反馈，能够更有效地提升基础承载可靠性和变形控制水平。未来，随着公路桥梁建设持续向复杂地质区域延伸，基础设计应进一步加强数字化分析、精细化参数识别和多源信息融合，不断提高对复杂地质环境的适应能力，为桥梁工程高质量建设与安全运营提供更加坚实的基础支撑。

参考文献

[1] 张灵.复杂地质条件下桥梁基础设计的关键问题与创新方法[J].汽车周刊,2025,(06):247-249.

[2] 蒋凡.复杂地质条件下桥梁基础选型研究[D].南京大学,2017.

[3] 安航.贵州山区复杂地质条件下高速公路的桥梁基础施工[J].交通世界,2018,(14):90-91.