

复杂地质条件下桥梁桩基施工技术创新与灾害防治

崔秀彦¹, 刘成强²

(1. 青岛庚信建设管理有限公司, 山东 青岛 266400;
2. 山西晋达交通建设工程监理有限公司, 山西 太原 030000)

摘 要 桥梁是交通运输网络的重要节点, 在跨越河流、峡谷和复杂地形中起着不可替代的作用。但是, 随着我国桥梁建设的大规模发展, 越来越多的工程需要在复杂的地质条件下进行, 桥梁桩基础建设面临着诸多技术难题和灾害隐患。本文以复杂地质条件下桥梁桩基础施工为研究对象, 针对复杂地质条件下桥梁桩基础施工中存在的问题, 从特殊桩型设计、先进钻进和成孔工艺等方面进行深入研究, 深入探索施工过程中塌孔、缩径、桩身缺陷等灾害防控对策, 并结合实际工程案例对该技术的应用效果进行验证, 以期为提高复杂地质条件下桥梁桩基础施工质量和安全提供有力支撑, 促进我国桥梁工程技术进一步发展。

关键词 复杂地质; 桥梁桩基; 施工技术创新; 灾害防治

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.017

0 引言

软土地基高压压缩低承载力、岩溶地区溶洞及地下暗河分布、砂卵石地层硬度高、透水性强等复杂地质条件, 给桥梁桩基础施工带来了很大难度, 增加了施工的不确定性与风险性。桩基础是桥梁的基础, 桩基础的施工质量和稳定性对桥梁的安全和耐久性有重要影响。因此, 创新适应复杂地质条件下的桥梁桩基础施工技术, 制定有效的灾变防控措施, 是保证桥梁工程顺利实施、延长桥梁服役寿命的关键。

1 复杂地质条件对桥梁桩基施工的挑战

1.1 软土地基

软土地基具有高含水率、高孔隙比、高压缩性和低抗剪强度等特点, 给桥梁桩基施工带来了许多技术难题。从桩基础沉降角度看, 由于软土的高收缩特性, 使得桩基础在施工和使用过程中容易产生不均匀沉降。如某沿海桥梁施工, 部分桩基施工结束后, 由于上部结构的推进, 软土地基不断压缩变形, 导致桩顶沉降超过设计允许值, 最大沉降差异达 5 厘米, 严重威胁到桥梁结构的稳定, 甚至造成桥面不平度, 严重影响行车舒适性和安全性。软土地基在施工过程中也会发生侧向位移。这主要是由于它的抗剪强度较低, 很难有效地抵抗施工过程中的扰动和外荷载的影响。侧向位移对桩身产生附加弯矩, 极大地增加了桩身的破坏风险。一旦桩发生断裂, 整座桥基将失去支撑, 造成

重大的安全事故。软粘土地基在长期服役过程中, 其流变特性是不可忽视的。随着时间的推移, 软土地基在持续荷载的作用下将产生蠕变, 从而使桩基础承载力不断下降。这给桥梁的长期安全带来了巨大的隐患, 需要在运营期间对其进行频繁的检测和加固, 从而增加维修费用。因此, 为保证桥梁桩基础施工质量和长期稳定运营, 必须在施工前充分调查分析, 制定针对性的施工技术方案^[1]。

1.2 岩溶地区

岩溶地区存在大量的溶洞、溶沟和溶槽。在桩基础施工过程中, 若有溶洞, 易发生漏浆、塌孔等现象。如在山区桥梁工程中, 部分桩基钻孔时突然出现大量泥浆渗漏, 致使钻孔水位骤降, 从而导致钻孔塌孔, 导致施工中断。如果溶洞面积较大, 事先没有探测到, 可能会造成桩身悬空, 达不到设计承载力的要求。同时, 岩溶地区基岩起伏不定, 使得桩基嵌岩施工难度大, 难以保证桩端与基岩的有效黏结, 进而影响其承载性能^[2]。

1.3 砂卵石地层

砂卵石地层粒度大, 硬度高, 渗透性能好。桩基础成孔施工中, 采用常规钻具破碎砂卵石困难, 钻进效率十分低下。如某江河大桥桩基施工, 采用传统回转钻进技术, 一天只能钻 1~2 米, 远不能满足施工要求。另外, 由于砂卵石层具有很强的渗透性, 泥浆护壁很难形成有效的护壁层, 极易发生塌孔。同时,

由于砂卵石层的存在,可能会造成混凝土的非均匀扩散,从而影响到桩身的完整性与强度。

1.4 其他复杂地质条件

除上述共同复杂的地质条件外,还存在膨胀土遇水膨胀、失水收缩等特点,对桩基产生较大水平推力,造成桩基变形甚至破坏。冻土区地基土低温冻结可提高强度,但升温易发生融解,导致地基承载能力急剧降低,对桩基施工和桥梁的正常运营造成巨大挑战。此外,在存在断层和破碎带的地区,地质结构复杂,岩体破碎,桩基施工过程中极易发生孔壁坍塌、漏浆等病害,且桩基础承载力难以得到保障^[3]。

2 桥梁桩基施工技术创新

2.1 特殊桩型设计与应用

1. 扩底桩。针对软土地基承载力不足的现状,采用扩底桩可有效增加桩端接触面积,提高承载力。扩底桩是利用机械扩底钻头等特殊扩底设备,在桩端形成扩底形。如在软土地基上修建一座桥梁,就采用一种直径1.2米,桩端扩底直径1.8米的扩底桩。现场静载荷试验结果表明,扩底桩单桩极限承载力比相同长度的等径桩高约40%,能有效地满足上部结构的荷载需求^[4]。

2. 异形桩。在喀斯特地区,为适应复杂的地质条件,采用梅花桩和十字形等异形桩。异形桩的特殊外形能增强桩—土界面间的摩擦及咬合力,从而增强岩溶地区桩基础的稳定性。如在某岩溶区桥梁施工中,部分桩基础采用梅花桩,其桩径0.8米,呈梅花形。数值模拟与现场监测表明,梅花型桩具有良好的抗偏能力,可有效减小桩侧偏移,提高承载力。

2.2 先进钻进与成孔工艺

1. 旋挖钻进工艺。旋挖钻井技术在复杂地质条件如砂卵石地层中有明显的优越性。旋挖钻机配有短螺钻、取芯钻和捞砂钻头等多种钻头,适用于不同粒度的砂卵石地层。旋挖钻机利用钻杆的旋转压力,使钻头切入地层,排出钻渣。如在砂卵石层进行桥梁桩基施工时,采用旋挖法施工,平均日钻深5~8米,钻井效率大幅度提高。同时,采用旋转钻进技术,可有效控制钻孔垂直度、孔径,减少塌孔等事故^[5]。

2. 冲击反循环钻进工艺。冲击—反循环钻井技术适合于复杂地层,尤其适用于岩溶地区及硬岩地层。该技术是利用冲击钻头对地层进行冲击破岩,再通过逆循环系统排出钻孔内的岩屑。在喀斯特地区,冲击钻头可以对溶洞周围岩石进行有效的破碎,如果遇到大型溶洞,可以用片石、粘土等填充材料,然后冲击钻进,形成稳定的孔壁。如在岩溶地区桥梁桩基施工中,采用冲击—反循环钻进技术,成功地通过一系列直径3~5米的大溶洞,从而确保桩的顺利成孔^[6]。

2.3 桩基施工辅助技术创新

1. 泥浆制备与处理技术。在复杂的地质环境中,高质量的泥浆起到护壁、排渣等作用。研制新的泥浆材料,如具有优良的护壁性能、携渣性及稳定性的聚合物钻井液。高分子聚合物泥浆能在孔壁表面形成一层坚硬的泥皮,有效地防止孔壁坍塌;同时,利用泥浆净化装置等先进的泥浆处理设备,实现泥浆的分离和纯化,达到泥浆循环利用,降低建设费用,减少环境污染。例如:在软土与砂卵石相间的桥梁桩基施工中,采用高分子聚合物钻井液可使塌孔率小于5%,同时采用净浆设备使泥浆回收利用率达80%以上。

2. 地质超前预报技术。在岩溶地区复杂地质条件下,准确把握桩前地质状况是桩基施工的关键。利用地质雷达和超前钻探等技术,可以对地下溶洞、断裂等地质异常的位置、规模及性质进行超前探测。如某岩溶区桥梁工程,在桩基础施工前,利用地质雷达扫描桩位,发现若干直径1~3米的溶洞,为调整施工方案提供依据。在此基础上,采取充填混凝土和埋设钢护筒等有针对性的处理措施,以避免在施工过程中因遇不明溶洞而发生事故。

3 灾害防治策略

3.1 施工过程灾害防治

1. 塌孔防治。在桥梁桩基施工过程中,常发生塌孔事故。为防止塌孔,施工前应根据工程地质情况,选用适当的泥浆参数,如泥浆的比重、粘度和含砂率等。对于易塌陷地层,如软土、砂卵石地层,可适当增加泥浆的比重、粘度,提高泥浆护壁能力。同时,要控制钻进速度,避免过快对孔壁产生过大的扰动。如某软土地基桩基施工时,泥浆比重为1.2~1.3,粘度为25~30秒,钻进速率控制在0.5~1米/小时,有效地降低塌孔。一旦发现塌孔现象,应及时停钻,并回填粘土或片石等材料,待孔壁稳定后再下钻。

2. 缩径防治。软弱地基及高湿层是造成缩径的主要原因。为防止缩径,可以采用优质泥浆护壁,保证泥浆在孔壁上形成一层较好的泥浆保护层,减小土体侧向变形。同时,在下放钢筋笼时,应保证笼的垂直度,防止笼对孔壁产生刮擦,造成土体塌陷。另外,采用旋挖法等先进制孔技术,可实现孔径的精确控制。如在高含水率粉质粘土地层中进行桩基施工,经优化泥浆性质,采用旋挖钻进技术,使缩径率控制在3%以内,达到设计要求。

3. 桩身缺陷防治。桩身夹泥、断桩等缺陷严重影响桩的承载性能。为防止桩身质量问题,在灌注混凝土时,应保证混凝土配合比精确、工作性能好、流动性好。同时,要控制好浇筑速度与浇筑高度,以保

证混凝土的连续、均匀灌注。例如：某大桥桩基础混凝土灌注时，采用泵送混凝土，将灌注速率控制在 30 ~ 40 立方米 / 小时，混凝土灌注高度控制在 2 ~ 6 米之间，有效防止夹泥、断桩等缺陷。另外，灌注前要检查导管的密封性，确保没有渗漏。

3.2 自然灾害防治

1. 地震灾害防治。对于地震多发区桥梁桩基础的抗震性能提出更高的要求。通过对桩身钢筋的优化设计，提高桩身的抗弯抗剪能力。如在 8 度抗震设防地区进行桥梁工程时，采用增大桩身主筋数、直径等措施，可提高其抗弯承载力。同时，采用隔震技术，如在桩基础和承台间设置橡胶隔震支座等，可有效降低桩基地震作用。地震模拟试验结果表明，设置橡胶隔震支座可以使桩基承受的地震力减少 30% ~ 50%，从而提高桥梁的抗震安全性。

2. 洪水灾害防治。在跨河桥梁建设中，由于洪水的影响，桩基础可能受到冲刷破坏。通过设置护筒和抛石防护等防护措施，可提高桩基础的抗冲刷能力。如某河道桥梁桩基础施工完成后，在桩周围抛填 0.5 ~ 1 米的碎石，形成 1 ~ 2 米厚的抛石防护层。通过水模型试验及现场观测，发现抛石护坡可有效降低桩周土体冲淤，保护桩基础稳定。另外，在设计阶段，合理选择桥梁位置，避免将桩基础布置在强水流冲刷区，对防洪减灾具有重要意义。

3. 其他自然灾害防治。针对泥石流、滑坡等自然灾害，在选址时应做好地质调查工作，避开易发生泥石流的区域及滑坡地段。在施工过程中，针对可能影响桩基础安全的山体，采用锚杆、锚索等方法进行边坡支护。在山区桥梁建设中，通过植被恢复、水土保持等措施，降低泥石流、滑坡等灾害的发生概率，保证桥梁桩基础安全。

4 应用案例分析

4.1 项目背景

某大型跨江桥梁工程，桥址处地质条件复杂，上部为深厚的软土地层，下部为岩溶发育的石灰岩地层，且桥位位于地震设防烈度为 7 度的地区，同时面临洪水冲刷的威胁。该桥梁桩基设计为直径 1.5 米的钻孔灌注桩，桩长 50 ~ 60 米，共计 100 根。

4.2 施工技术创新与灾害防治措施实施

在施工工艺上，针对软土地层，采用扩底桩，桩端直径 2.0 米，同时采用旋钻法，提高钻孔效率，提升成孔质量。针对岩溶地层，采用地质雷达、超前钻探等超前地质预测方法，提前探明溶洞位置及规模；采用冲击—反循环钻进技术穿越溶洞，在溶洞内充填

混凝土，埋设钢护筒。在配制泥浆时，采用聚合物泥浆，以保证护墙效果。

在灾害防治中，严格控制钻井液性能、钻速，防止塌孔、缩径。为避免出现桩身缺陷，必须严格控制混凝土配合比及施工工艺。根据震害情况，对桩基础的抗震配筋进行优化设计，并在桩帽与桩基础间增设橡胶隔震支座。对于严重的洪涝灾害，采用桩周埋设护筒、抛填片石的方法进行防护。

4.3 实施效果

通过实施上述施工技术创新与灾害防治措施，该桥梁桩基施工顺利完成。桩基的承载能力通过静载试验检测，均满足设计要求。在施工过程中，塌孔、缩径等事故发生率显著降低，仅为 3% 左右，桩身缺陷率控制在 1% 以内。在后续的桥梁运营过程中，经过多次洪水考验和地震监测，桥梁结构稳定，桩基未出现明显的变形和损坏，有效保障桥梁的安全使用，取得良好的经济效益和社会效益。

5 结束语

复杂地质条件下的桥梁桩基施工面临诸多挑战，特别是特殊桩型设计、先进的钻孔成孔技术及辅助施工技术的创新，可有效应对复杂地质环境，提高施工效率与桩基质量。在此基础上，建立一套涵盖施工全过程灾害与自然灾害防控的策略，可有效降低施工风险，保证桥梁长期安全使用。工程实例表明，上述技术革新及防灾措施取得较好的应用效果。然而，随着桥梁建设向复杂地质地区发展，需要进一步研发更先进、更高效、更可靠的施工技术与灾害防控方法，如智能施工设备及监控系统、新型地基处理技术，以满足持续发展的桥梁工程建设需求，促进桥梁工程技术的不断进步。

参考文献：

- [1] 田子杨. 桥梁桩基施工技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2023(19):109-111.
- [2] 张羽轩. 浅谈桥梁桩基施工技术要点及质量控制措施[J]. 散装水泥, 2024(01):99-101.
- [3] 袁清明. 岩溶地区桥梁桩基施工技术研究[J]. 自动化应用, 2023,64(07):127-129,131.
- [4] 赵孝虎. 基于岩溶地区的高速铁路桥梁桩基施工技术研究[J]. 中国设备工程, 2023(07):213-215.
- [5] 吕华, 王守增, 张广超. 桥梁桩基施工技术及质量控制[J]. 越野世界, 2024,19(16):98-99.
- [6] 王乐文. 浅谈桥梁施工中桩基施工技术要点[J]. 工程建设与设计, 2024(14):200-202.