

摘要

冲刷损伤后中小跨径桥梁失效模式研究

我国地处自然灾害频发、易受影响地区，由于自然灾害引发的桥梁损毁与失效会对交通通行产生严重影响，甚至会造成重大的经济损失与社会影响。桥梁的安全性和可靠性一直是交通领域持续关注的问题。研究资料表明，众多桥梁由于冲刷而导致承载能力不足，甚至发生倾覆倒塌等问题，冲刷俨然成为一种常见的桥梁损伤形式。因此，准确判断冲刷损伤后桥梁失效模式，快速评估出桥梁承载能力与通行能力对保障桥梁安全性至关重要，更是确保我国民生和财产安全的关键任务。

桥梁承载性能是评价桥梁安全性能的重要参数。国内外学者已对冲刷后桥梁基础的承载能力和稳定性进行了广泛研究，但很少有研究涉及到车辆荷载作用下桥梁冲刷后失效模式探究与极限承载能力评估。为解决上述问题，本文依托国家重点研发计划项目课题“重点区段结构安全和抗灾韧性提升关键技术及装置”（编号 2021YFB2600604, 2021YFB2600600），结合国家自然科学基金面上项目“基于动力特性的冲刷损伤后中小跨径桥梁可靠性快速评定方法研究”以及吉林省交通厅“G331 中小跨径桥梁准快评估及快速抢修技术研究”，通过理论分析与数值模拟，对冲刷损伤后桥梁在车辆荷载作用下失效模式进行探究，并计算了不同失效模式情况下桥梁结构极限承载力，形成了冲刷损伤后桥墩极限承载力快速评估方法。本文主要研究内容如下：

(1) 在梳理桥梁下部结构承载能力基础上，构建了基于有限单元法和迭代计算的桥墩极限承载力求解方法。首先，基于双曲线法 $p-y$ 曲线模拟了桩周土体作用，考虑了材料非线性并定义了结构失效准则；其次，基于有限单元法和迭代计算思想，构建了外力荷载作用下墩顶位移求解方法；基于墩顶处荷载-位移曲线，对冲刷损伤后车辆荷载作用下桥梁下部结构材料屈服承载能力进行计算；最后，通过有限元软件对所建立方法的正确性进行验证，并与规范中墩顶位移限值对比分析，得到了不同冲刷深度下桥墩屈服破坏承载能力的变化规律，为实际工程实践提供参考指导。

(2) 当冲刷深度过大，桥墩在未发生屈服破坏前可能会出现倾覆失稳破坏现象。为此，构建了基于力矩守恒的倾覆失稳判断准则，并利用结构影响线求解力矩量值；基于迭代计算思想，求解了不同冲刷深度下倾覆失稳极限荷载，形成了墩身倾覆角与失稳极限荷载的关系；通过对失稳极限荷载与屈服破坏承载能力进行比对分析，准确判

断了桥梁下部结构在不同冲刷深度下的失效模式，为桥梁结构体系分析奠定了基础。

(3) 基于桥梁下部结构承载性能研究，对简支梁桥结构体系失效模式进行探究。首先，建立了力学简化模型，明确了外力荷载在桥墩上的重分配；其次，考虑下部结构屈服破坏与失稳破坏两种破坏模式，当车辆荷载施加于桥梁不同位置以及下部结构不同冲刷深度情况下，分析了桥梁冲刷损伤后各下部结构承载能力与破坏顺序，明确了冲刷损伤后简支梁桥结构体系失效模式；最后，基于麦夸特-全局优化法构建了桥墩极限承载力快速评估方法，为保障桥梁冲刷损伤后行车安全奠定基础，并为冲刷损伤后桥梁状态评估提供参考依据。

关键词：桥梁，冲刷，承载能力，车辆荷载，倾覆失稳

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 桥梁下部结构承载能力研究.....	3
1.2.2 桥梁下部结构稳定性研究.....	6
1.3 本文的研究内容.....	7
第 2 章 桥梁下部结构承载能力计算分析	10
2.1 引言.....	10
2.2 梁模型非线性有限元分析概述.....	10
2.2.1 单桩简化理论基础.....	11
2.2.2 梁模型本构关系.....	12
2.2.3 桩土弹簧模型选取.....	13
2.2.4 结构失效准则.....	16
2.3 基于有限单元法的下部结构承载力计算	18
2.3.1 梁模型初始刚度矩阵求解.....	18
2.3.2 桩身刚度矩阵修正计算.....	20
2.3.3 桩土弹簧迭代求解.....	23
2.3.4 外力荷载墩顶位移迭代求解.....	24
2.3.5 理论方法算例分析.....	27
2.4 基于有限元数值模拟的承载能力计算	30
2.4.1 桩土作用弹簧单元选择.....	31
2.4.2 桩基础单桩简化计算.....	32
2.4.3 实体单元数值分析模型.....	35
2.5 验证分析.....	36

2.5.1 数值算例对比.....	36
2.5.2 本文方法与规范对比分析	37
2.6 本章小结.....	39
第 3 章 桥梁下部结构稳定性分析与计算	41
3.1 引言.....	41
3.2 桥梁下部结构稳定性计算	41
3.2.1 倾覆失稳破坏简化模型	41
3.2.2 单桩倾覆失稳破坏理论分析	43
3.2.3 失稳极限承载力求解	46
3.3 计算结果分析.....	48
3.3.1 失稳极限荷载.....	48
3.3.2 下部结构极限承载力分析	50
3.4 本章小结.....	51
第 4 章 桥梁结构体系失效模式分析	53
4.1 引言.....	53
4.2 简支梁桥失效模式分析与计算	53
4.2.1 简支梁桥力学简化模型	54
4.2.2 均匀冲刷下简支梁桥失效模式计算分析	57
4.2.3 不均匀冲刷下简支梁桥失效模式计算分析	61
4.2.4 简支梁桥墩极限承载力预测方法	66
4.3 本章小结.....	68
第 5 章 结论与展望.....	71
5.1 结论.....	71
5.2 展望.....	73
参考文献.....	75

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

交通运输是基础性、先导性、战略性的产业，是现代化经济体系的重要组成部分。桥梁作为我国交通运输体系中的主体，更是重要的社会资产，桥梁的安全性能和保障能力对交通畅通至关重要，桥梁损坏会导致交通瘫痪，甚至影响人民安全。然而，我国常年发生因自然灾害导致的桥梁损毁，对交通生命线和人民群众的生命财产都将造成巨大的损失且对社会造成不良影响。因此，对灾后桥梁开展桥梁结构安全性能研究对我国桥梁事业发展具有重大意义。

我国是世界上自然灾害种类最多的国家，因此桥梁结构会产生各种病害，其中水文因素的影响尤其显著，冲刷破坏又是在水文因素影响中最常见的破坏方式，且冲刷造成的安全隐患最为突出。因此，冲刷俨然成为导致桥梁结构严重损毁的关键因素。熊文^[1]收集了国内外 1716 座桥梁倒塌案例信息，给出了数据库案例失效原因的分类统计。桥梁水毁失效占总体数据的 46.69%，总占比第二的碰撞失效仅为 8.92%，其实失效比例与水毁失效差距明显。桥梁水毁逐渐成为主要失效原因，并且在水文因素中冲刷失效占比最高，高达 31.53%。

2023 年 7 月 31 日，位于北京市丰台区的小清河桥，因天气持续降雨，桥墩受洪水冲刷导致基础裸露，桥墩倒塌进而导致整片桥梁垮塌；2020 年 8 月 19 日，因暴雨天气水流量陡增，陇川麻栗坝水库工程渡槽倾覆，大量洪水集中加剧了墩基础冲刷，当桩基础受到水流冲刷后，导致桩土因冲刷被掏空，造成不均匀沉降导致结构倾斜甚至倾覆；2021 年 3 月 29 日，哈尔滨方正县新兴大桥因凌汛垮塌，分析原因为凌汛期间可流动水横截面的减少，使得产生高速的底层水流，对桥墩基础产生迅速而强大的侵彻，掏空桥墩基础，进而致使整垮桥梁坍塌。2022 年 8 月，长时间集中降雨导致 G6 京藏高速纳太沟中桥发生了损毁下沉，桥墩扩大基础被山洪掏空，桥墩局部损毁，致使下行方向桥面发生塌陷，道路通行受到影响。



图 1.1 北京市小清河桥垮塌事件



图 1.2 麻栗坝水库渡槽垮塌事件



图 1.3 哈尔滨方正县新兴大桥垮塌事件



图 1.4 京藏高速纳太沟中桥

从一例例惨痛的桥梁安全事故中我们可以看到，由于自然灾害的影响，尤其是极端天气而引发的洪水气象，对桥梁桩基础周围土体的破坏，对桥梁下部结构承载能力造成巨大影响，因桥梁承载能力不足而导致整垮桥梁发生垮塌事件。我国是自然灾害频发、易发地区，洪水突然性与冲刷的普遍性对桥梁结构安全性能产生的影响更加无法忽视。针对这一日益严峻的问题，最好的解决办法就是对灾后桥梁的承载能力作出科学的评价，评估冲刷后桥梁能够承受的极限荷载，判断灾后其安全性能与通行能力。

我国目前常用的桥梁结构安全性评价方法主要分为外观调查法、分析计算法和荷载试验法，用于评定桥梁的承载能力。外观调查法通过检测结构缺陷和病害来评定桥梁承载能力，分析计算法则利用相关桥梁结构理论进行计算分析，荷载试验法则进行静载试验和动载试验，对结构进行评定。

在实际的工程应用中，以上方法均存在不足。基于外观调查法的评定结果依靠经验取值的成分比较多，受调查人员的主观影响大，结果稍显粗糙，仅可为既有桥梁承载力的初始评定提供参考；基于荷载试验法虽然其优点明显，结果直观且可靠，但是需借助过多外部设备，并且需要封闭交通，试验过程甚至可能对结构产生二次损伤。

为加快建设交通强国，构建现代综合交通运输体系，本文依托国家重点研发计划项目课题“重点区段结构安全和抗灾韧性提升关键技术及装置”(编号 2021YFB2600604，

2021YFB2600600), 结合国家自然科学基金面上项目“基于动力特性的冲刷损伤后中小跨径桥梁可靠性快速评定方法研究”以及吉林省交通科学研究所项目“G331 中小跨径桥梁准快评估及快速抢修技术研究”, 以正确判断冲刷状态下桥梁安全状态与准确判断桥梁失效模式为目的, 基于理论与数值模拟, 对冲刷损伤后桥梁在车辆荷载作用下失效模式进行探究, 并计算不同失效模式情况下桥梁结构极限承载力, 形成冲刷损伤后桥墩极限承载力快速评估方法。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 桥梁下部结构承载能力研究

桥梁承载性能是评价桥梁安全性能的重要参数, 国内外许多学者针对冲刷后桥梁基础承载能力与稳定性能做了许多研究, 下部结构桩基冲刷问题已引起一些学者的关注, 大多研究集中在冲刷深度、范围的确定^[2], 近年来国内外逐渐对桥梁下部结构承载能力的研究不断深入, 其开发和应用得到了快速发展。

Lin 等^[3]通过考虑土壤、桩基和上部结构的相互作用, 对冲刷条件下整座桥梁的横向性能进行了综合研究, 提出了一维 $p-y$ 曲线简化方法解决冲刷孔尺寸对粘土和砂土中横向荷载桩性能的影响。利用综合分析程序分析土-桩-基础-结构相互作用, 并考虑剩余土的应力历史变化, 评估了不同冲刷深度下桥梁的横向性能。分析结果表明, 冲刷对侧向受力桩的受力性能有显著影响; 然而, 由于桥梁结构中桥梁构件的相互作用, 冲刷对整个桥梁横向性能的影响显著降低。

Ni 等^[4]研究了土刚度、桩头固定度和桩长细比等因素对孤立桩附近冲刷引起的横向承载力下降百分比变化的影响。此外, 在桩长细比大于 10 之后, PDC 值几乎保持不变, 所以短桩由于土壤冲刷而导致的横向荷载降低将更加严重。

宋明泽^[5]运用现场监测试验、有限元数值模拟和理论分析相结合的方法, 对矩形群桩基础的承载特性进行了深入研究。

Lin 等^[6]假定冲刷坑尺寸已知, 对 Reese 经验 $p-y$ 曲线^[7]的桩侧极限抗力进行了冲刷条件下的修正, 得到了砂土中的相应 $p-y$ 曲线; 杨晓峰等^[8]基于荷载等效原则和应变楔模型^[9], 对桥梁桩基前的土体楔形体进行了等效深度修正, 提出了冲刷条件下砂土中水平受荷单桩的等效应变楔方法, 并与 Lin 等^[6]的方法进行了对比。

Diamantidis 等^[10]对冲刷桩柱的横向承载能力进行敏感性分析。

李成才等^[10]通过系统研究，拟合出了局部冲刷深度与水流条件、局部冲刷深度与墩宽之间的关系曲线。

刘谨等^[12]研究了水流与桥墩夹角对桥墩冲刷的影响，以及波流共同作用下桥墩的最大冲刷深度。

康家涛^[13]采用实桥调查和水下检测等方法，判定了墩台冲刷形态，并分析了冲刷对桥墩安全性和稳定性的影响，当地基底被冲刷掏空 20%时，地基的变形与应力将发生较大变化，基础可能会失效。

梁锴等^[14]通过改变基础底部的支承方式来模拟基底的不同程度掏空，得到了基础底部压应力和桥墩顶部位移的变化规律。结果表明：随着基底掏空面积的增加，基底的压应力逐渐增大，导致墩顶的横向和竖向最大位移显著增加。

陈伟等^[15]通过ABAQUS软件建立了桥墩基础计算模型，研究了局部冲刷深度对桥墩承载力和最大弯矩的影响。研究结果显示，随着局部冲刷深度的增加，桥墩承载力减小，位移增加，同时最大弯矩向下移动。

靳绍岩等^[16]在进行过勘察与计算分析的基础上，对不同冲刷作用下墩顶位移的变化规律做出了分析，建立了可以进行桥墩沉降分析的地基模型，并结合Matlab程序算法找到了墩顶横向位移与基底冲刷面积百分比之间的关系。结果表明：随基底冲刷百分比的增大，基底岩层受力情况随之改变，基底沉降差增大，从而使得桥墩顶部水平位移增大。

袁茂林^[17]针对冲刷对群桩的刚度和抗弯性能进行了分析。研究结果显示，冲刷导致群桩横向平移刚度和竖向扭转刚度明显降低，而竖向平移刚度受影响较小；随着冲刷深度的增加，群桩的抗弯承载力减小，对桥梁的安全运营造成影响。

薛九天等^[18]通过分析泥沙的特性，对不同冲刷深度下桥墩单桩基础的竖向承载力、沉降进行了分析研究。结果表明：随着冲刷深度的加深，桥墩单桩基础承载力有逐渐减弱的趋势，且基础沉降越来越大。

陈鹏等^[19]利用有限元差分计算对桥墩群桩基础进行分析，主要研究了不同河水冲刷作用下桥墩桩基础沉降以及桩基水平位移变化，结果发现河水冲刷对桥墩单桩基础产生的作用比较明显，桩基水平位移以及沉降均有明显改变。

胡丹^[20]通过在室内做模拟试验的方式研究了不同冲刷深度下桩基顶部水平位移以及桩身应力变化，得到了桥墩桩基础水平承载能力的变化规律。试验结果表明：随冲

刷深度的增加，桩基承载能力明显降低，桩身最大弯矩增加，且最大弯矩所处的位置上移。

Kishore 等^[21]对冲刷影响单桩水平承载力的性能展开研究，结果表明，桩基侧向出现了较大的变形，水平方向的承载力明显下降。

何泓男等^[22]通过改变冲刷深度来模拟不同局部冲刷作用，对群桩进行了冲刷前、后水平承载试验，研究表明冲刷深度对水平承载力、桩身弯矩及水平群桩效率系数都有较大影响。

胡丹等^[23]利用自行设计加工的水平加载装置，进行了一系列不同冲刷深度下的桩基室内模型试验，对单桩在水平荷载作用下的承载性能性状进行了模拟和分析。

高洋^[24]利用有限元软件建立桩基础模型，分析了冲刷深度、土质条件、长细比等因素在不均匀冲刷形态下对基桩的影响，以及探讨群桩的桩间距变化在三种冲刷形态下对群桩竖向承载特性影响的规律。

张安银等^[25]考虑应力历史的条件下，研究冲刷对剩余土体能给桩基础提供的横向土压力的影响并进行了分析与评价。

唐华威等^[26]对沉井加桩复合基础进行了冲刷条件下的静载和循环后静载模型试验，得到了基础的水平荷载位移曲线和循环滞回圈。

何彦承等^[27]通过室内模型试验，采用开挖对冲刷效应进行模拟，研究单桩及沉井加桩基础在冲刷前后水平承载性能的变化。

木林隆等^[28]通过流水槽试验以及水平荷载试验，对沉井加桩基础在极限埋深状况下的冲刷坑深度以及冲刷前后水平极限承载力进行了分析。

戴国亮等^[29]对修正的 p - y 曲线进行砂土中单桩水平承载力的理论推导，利用LPILE软件进行了模拟计算并和室内模型试验进行数据对比，结果表明冲刷深度、冲刷坡角和冲刷宽度的参数敏感性的影响程度依次下降。

陈稳^[30]通过利用有限元软件ANSYS分析了河流冲刷所引起的桥墩基础埋深降低对桥墩承载力的影响规律，得出了桥墩水平承载力在不同冲刷深度下的变化趋势。结果表明：河流冲刷越深，基础埋深越浅，桥墩水平承载力就越降低。

以上学者对桥梁下部结构承载能力进行了深入研究，对桥梁下部结构承载能力研究路径给出了可借鉴经验。

1.2.2 桥梁下部结构稳定性研究

Kameshwar S 等^[31]主要研究车辆荷载作用下桥墩冲刷作用下桥梁的易损性函数。开发了基于桥梁细节、冲刷深度和车辆荷载参数化的脆弱性函数，以帮助管理冲刷桥梁上的交通，防止危及生命的事故。考虑了车辆诱导载荷（即垂直重力载荷和车辆制动产生的纵向载荷）引起的失稳。研究了桥梁柱、桥台和支座在制动载荷作用下的失稳破坏和承载能力不足引起的破坏。

POULOS H G 等^[32]分析了处于理想弹性体中的垂直桩在侧向荷载和力矩作用下的水平位移和旋转。给出了自由头桩和固定头桩的各种柔性和长径比的影响因素。将弹性分析扩展到包括土壤和桩之间的局部屈服的影响。

卢智^[33]研究了不同桩身断面形状对水流冲刷下桩身稳定性和抗力的影响，研究证实合理的断面形状可以有效提高桩身的稳定性。

杨凯等^[34]研究表明，基底掏空会影响桥墩的稳定性和基底应力。随着基底掏空程度增加，桥墩的抗倾覆性减弱，基底最大压应力增长速度逐渐加快。

曾自愚^[35]主要研究了在基底遭受不同程度冲刷的情况下桥墩的稳定性、应力以及变形的变化规律，讨论了桥墩基础所处的地基环境对桥墩整体稳定性的影响。结果发现在基底被不同程度冲刷时，桥墩稳定性降低，应力以及变形有明显增大。

Daniels 等^[36]提出重力恒载和活载，以及作用在排架顶部附近的水平洪水荷载可能会导致弯曲的推倒失效，进而导致桥梁失效，其介绍了不同高度、重力荷载水平和冲刷水平的这种桩排架的推覆荷载。

Zach L 等^[36]提出了一种基于概率的方法来估计冲刷对桥梁的综合危害效应，将冲刷效应视为等效荷载效应，以便将其纳入基于可靠度的桥梁破坏计算中，提出了将冲刷深度视为等效荷载效应的一般原则。

Sung Y C 等^[38]为了减轻冲刷造成的桥梁损坏，改进水位、流速和冲刷深度三个基本参数影响的预警系统。通过对水位和流速的有限元分析，在不同的破坏模式中选择可以确定具有一定安全系数程度的桥梁基础临界冲刷深度。建立了各种可能的水位、流速和临界冲刷深度集合之间的关系，给出了不同安全系数水平对应的结构安全曲面。

Zhou L^[39]将 3 个相同的 2×3 钢筋混凝土(RC)群桩试件埋入总冲刷深度等于 5 倍单桩直径的均质中密度砂土中，在承台处施加侧向循环荷载，使桩处于预定损伤状态。最后对这些表现出永久侧向位移的受损试件进行垂直向下的推覆，以评估其剩余承载能

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/277154054134006166>