

群桩基础在复杂水流条件下的流场特性探讨

吴子恒

连云港科谊工程建设咨询有限公司 江苏 连云港 222042

摘要: 本文系统综述了群桩基础在复杂水流（包括单向流、往复流、波流耦合及斜流）作用下的流场特性研究进展。通过分析绕流机理、尾涡结构演化、流速分布规律及局部冲刷机制，揭示了桩间距、排列方式、雷诺数、弗劳德数及水流方向角等关键参数对流场结构的影响规律。同时，探讨了当前研究中存在的挑战与不足，并对未来研究方向提出展望。研究表明：群桩间的相互干扰效应显著改变局部流场结构，导致流速加速、涡旋增强及冲刷深度非线性变化；在复杂水流条件下，流场呈现高度非定常与三维特性，传统单桩设计方法难以准确预测群桩基础的实际水动力荷载与冲刷行为。本文旨在为群桩基础的优化设计与安全评估提供理论支撑。

关键词: 群桩基础；复杂水流；流场特性；涡旋结构；局部冲刷；水动力荷载

引言

随着海洋资源开发、跨海通道建设及沿海城市发展的持续推进，大型海洋平台、跨海桥梁、海上风电等重大基础设施日益增多。这些结构物通常采用群桩基础以承担巨大的竖向与水平荷载。然而，其所处的海洋或河口环境往往伴随复杂的水流条件，如潮汐引起的往复流、风浪作用下的波流耦合、河流弯道处的斜向水流等。在此类复杂水流作用下，群桩基础周围的流场呈现出高度非线性、非定常及三维特性，进而诱发强烈的局部冲刷、涡激振动及结构疲劳等问题，严重威胁工程安全。相较于单桩，群桩基础由于桩与桩之间的相互干扰，其绕流特性更为复杂。早期研究多集中于单桩绕流，而对群桩系统在复杂水流中的流场响应认识尚不充分。近年来，随着计算流体力学（CFD）技术的发展、高精度物理模型试验手段的进步以及现场监测数据的积累，群桩基础在复杂水流中的流场特性研究取得了显著进展。然而，现有研究仍存在诸多挑战，如多物理场耦合机制不清、尺度效应显著、缺乏统一的设计准则等。

1 复杂水流类型及其对群桩基础的影响

1.1 单向流

单向流是最基本的水流形式，常见于河流或人工水道中。在单向流作用下，群桩基础的绕流特性主要受桩间距（ S/D ，其中 S 为桩中心距， D 为桩径）、排列方式（顺流/横流排列、交错排列等）及雷诺数（ $Re = UD/\nu$ ， U 为来流速度， ν 为运动粘度）的影响。研究表明，当 $S/D < 5$ 时，桩间存在显著的屏蔽效应（shielding effect），下游桩所受流速降低，尾涡减弱；而当 $S/D > 7$ 时，各桩可近似视为独立单桩。在中间间距范围内，桩间流场呈现复杂的干涉现象，可能出现流速加速区，加剧局部冲刷。

1.2 往复流

往复流由潮汐作用引起，具有周期性方向变化特征，广泛存在于河口与近岸区域。其流场特性与单向流存在本质差异：一方面，流速方向周期性反转导致涡旋结构不断生成、耗散与重构；另一方面，最大流速持续时间短，泥沙输运过程呈现“冲-淤”交替特征。在往复流中，群桩基础的最大冲刷深度通常小于同等峰值流速下的单向流，但冲刷坑形态更不对称，且恢复期泥沙回淤速率显著影响长期稳定性。

1.3 波流耦合

在近岸海域，波浪与水流常同时存在，形成波流耦合场。波浪引起的水质点轨道运动叠加背景流场，使得流速剖面、湍流强度及涡量分布发生剧烈变化。研究表明，波流同向时，近床面流速增大，冲刷加剧；反向时则可能抑制冲刷^[1]。此外，波浪的非线性（如斯托克斯漂移）会进一步改变泥沙输运方向。波流耦合下群桩尾涡呈现“双螺旋”结构，且涡脱落频率受波浪周期调制，导致水动力荷载频谱展宽。

1.4 斜流

斜流指水流方向与群桩排列轴线存在一定夹角（ θ ）的情况，常见于弯道桥梁或非正交码头。斜流破坏了流场的对称性，导致桩前驻点偏移、侧向流速分量增强，并在桩后形成倾斜尾涡。当 $\theta > 30^\circ$ 时，群桩间的流速分布极不均匀，部分桩体承受远高于平均值的局部流速，成为冲刷薄弱点。

2 群桩绕流的流场结构特征

2.1 涡旋结构演化

群桩绕流的核心特征是涡旋的生成与演化。在单向流中，每个桩体后方会形成卡门涡街（Kármán vortex

street),但在群桩系统中,上游桩脱落的涡旋会与下游桩相互作用,导致涡街失稳、合并或分裂。当桩间距较小时,下游桩可能处于上游桩的尾流再附区,抑制涡旋脱落;而较大间距下,涡旋可自由发展,但相互干扰仍会导致频率锁定(frequency locking)现象。在往复流中,涡旋结构呈现“双向对称”特征:每个半周期内形成一组涡旋,方向相反。由于流速加减速过程不对称,两组涡旋强度常不相等,导致净冲刷偏向某一方向。在波流耦合场中,涡旋结构受波浪相位调制。例如,在波峰通过时,垂向速度分量增强,促进三维涡环的形成;而在波谷期,流场趋于二维化。这种周期性调制使得涡量场呈现明显的时空非定常性。

2.2 流速分布与加速效应

群桩间的狭窄通道常导致流速显著加速,形成“文丘里效应”。数值模拟表明,在交错排列的群桩中,某些通道内的局部流速可达来流速度的1.8–2.5倍。这种加速效应不仅增加桩体表面剪切应力,还显著提升临界起动流速以上的泥沙输运能力,是局部冲刷深度超预期的主要原因。此外,近床面流速剖面受桩体扰动而偏离对数律分布^[2]。在桩前,存在低速回流区;桩侧,高速射流区形成;桩后,则为低速尾流区。这种复杂的速度梯度分布直接影响床面切应力的空间分布,进而控制冲刷坑的形态与范围。

2.3 湍流特性

群桩基础显著增强局部湍流强度。PIV与LDV(激光多普勒测速)测量显示,桩后尾流区的湍动能(TKE)可达来流的3–5倍。高湍流强度促进动量交换,加速涡旋耗散,同时也增强泥沙悬浮能力。在群桩系统中,湍流结构呈现多尺度特征:大尺度相干结构(如发卡涡)主导能量输运,小尺度涡旋负责耗散。复杂水流条件下,湍流各向异性增强,传统各向同性湍流模型(如 $k-\varepsilon$)难以准确捕捉流场细节。

3 局部冲刷机制与影响因素

局部冲刷是群桩基础失效的最主要诱因之一,其物理过程可概括为:水流扰动导致床面切应力超过泥沙起动阈值,引发泥沙输运,进而形成冲刷坑;随着冲刷坑的发展,局部流场重构,进一步影响冲刷的持续或趋于平衡。在群桩系统中,这一过程表现出显著的非线性与空间异质性。由于桩间流场的相互干扰,相邻桩的冲刷坑往往相互连通,形成更大范围的冲刷洼地,不仅削弱了单桩承载力,还可能降低群桩整体的协同工作性能。更为关键的是,群桩的最大冲刷深度并不遵循简单的线性叠加原则——在某些工况下,因屏蔽效应,最大冲刷深

度甚至小于单桩情况;而在另一些工况下,因流速加速效应,冲刷深度可能远超单桩预测值。此外,在斜流或波流耦合作用下,冲刷坑常呈现明显的不对称形态,偏向主流方向或波浪传播方向,这对基础的偏心受力和稳定性构成额外挑战。

影响群桩局部冲刷的关键因素众多。桩间距(S/D)被认为是最敏感的参数之一,大量研究表明,当S/D处于3至5之间时,冲刷最为严重,此区间被称为“临界干扰区”。排列方式同样重要,交错排列通常比矩形排列产生更深的局部冲刷,因其流道更曲折、加速效应更强。水流弗劳德数(Fr)反映了惯性力与重力之比,当 $Fr > 0.3$ 时,水面波动显著,自由表面变形不可忽略,进而影响近床流场结构与冲刷发展^[3]。泥沙特性(如粒径、级配、黏聚力)则决定了起动阈值与输运模式,细颗粒非黏性沙易被冲刷,而含黏土的混合床面可能在冲刷初期形成保护层,延缓冲刷进程。最后,水流的非定常性不容忽视:往复流虽峰值流速高,但有效冲刷时间短,其冲刷发展速率通常低于同等峰值的单向流,但长期累积效应仍需在设计中予以考虑。

4 研究方法与技术进展

4.1 物理模型试验

物理模型试验长期以来是研究群桩流场特性的可靠手段。通过在水槽或波流水槽中构建缩尺群桩模型,并结合染色示踪、粒子图像测速(PIV)、声学多普勒测速仪(ADV)等先进测量技术,研究者能够获取高时空分辨率的流场数据,直观揭示涡旋结构、速度分布及湍流特性。近年来,3D打印技术的应用使得复杂几何形状的群桩模型制作更为精确,显著提升了模型的几何相似性;同时,透明床面配合激光片光技术实现了床面变形与上覆流场的同步观测,为冲刷-流场耦合机制研究提供了直接证据。尽管存在尺度效应和相似律限制,物理模型试验仍是验证数值模型和提炼经验公式的基石。

4.2 数值模拟

随着计算能力的飞跃,计算流体力学(CFD)已成为群桩流场研究的重要工具。雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方法因计算效率高,广泛应用于工程初步设计阶段;而大涡模拟(LES)和分离涡模拟(DES)则能解析大尺度相干涡结构,更适合机理探索。近年来,浸没边界法(IBM)与光滑粒子流体动力学(SPH)等无网格或界面追踪方法的发展,使得处理复杂几何边界、自由表面及流固耦合问题成为可能。然而,准确模拟泥沙输运与床面演变仍是数值模拟的难点,通常需将流场求解器与泥沙输运模型(如基于Exner方程的床面演化模型)

进行耦合。尽管如此,多相流-结构耦合模拟仍面临计算成本高、模型参数不确定等挑战。

4.3 现场监测

现场监测虽成本高昂且实施困难,却能提供最真实、最具代表性的流场与冲刷数据。通过在实际工程结构(如跨海大桥、海上风电基础)周围布设ADCP、压力传感器、水下摄像系统及冲刷深度探针,可长期记录复杂海洋环境下的水流参数与冲刷演变过程。例如,港珠澳大桥和东海大桥等重大工程均开展了系统的群桩冲刷监测项目,积累了宝贵的实测数据库,不仅用于验证理论模型,也为极端事件(如台风过境)下的结构响应评估提供了依据。未来,随着物联网与智能传感技术的发展,实时、连续的群桩基础健康监测将成为可能。

5 工程启示与设计建议

基于对群桩基础在复杂水流中流场特性的深入理解,工程设计应超越传统的单桩简化方法,充分考虑群桩干扰效应与水流非定常性。首先,在平面布置阶段,应合理优化桩间距与排列方式,尽量避免S/D落入3-5的临界干扰区;对于高流速区域,可采用顺流向加大间距的非均匀布置,以削弱流速加速效应。其次,针对斜流或波流耦合等复杂工况,设计验算应覆盖多个水流方向角和波浪入射角,识别最不利冲刷情景。第三,应摒弃仅依赖平衡冲刷深度的静态设计理念,转而采用考虑时间历程的动态冲刷模型,尤其在往复流环境中,需评估冲刷-回淤循环对长期稳定性的累积影响^[4]。此外,在冲刷高风险区域,应辅以工程防护措施,如铺设土工格栅、抛填块石或设置导流板,通过改变局部流场结构来抑制冲刷发展。最后,在关键项目中,建议采用多尺度数值工具组合策略:先用RANS模型进行全局筛查,再对高风险区域采用LES进行精细化模拟,以兼顾效率与精度。

6 挑战与展望

尽管群桩基础流场特性研究已取得长足进步,若干关键挑战依然制约着理论向工程实践的有效转化。首先,水流-结构-泥沙-波浪之间的强非线性、多尺度耦合机制尚未完全厘清,全耦合数值模拟计算成本极高,且缺乏统一的理论框架。其次,物理模型试验难以同时满足弗

劳德数与雷诺数的双重相似准则,导致模型结果外推至原型时存在不确定性,尺度效应问题亟待解决。再次,现有研究多聚焦于常规水流条件,对台风、风暴潮等极端事件下群桩基础的瞬态响应与灾变机制认识不足。最后,工程实践中仍缺乏基于实时流场感知的智能冲刷预警与评估系统。面向未来,研究应聚焦于四个方向:一是发展高效、高精度的多相流-结构耦合数值模型,融合机器学习加速求解过程;二是构建基于大数据与人工智能的冲刷深度预测代理模型,实现快速风险评估;三是推动全尺寸或大比尺现场试验,获取高保真数据以验证并改进现有理论;四是探索新型抗冲刷基础构型,如仿生桩形、透空式群桩或主动流场调控装置,从源头上改善流场结构,提升基础设施的韧性与可持续性。

7 结语

群桩基础在复杂水流条件下的流场特性是涉及流体力学、泥沙动力学与结构工程的交叉科学问题。本文系统分析了单向流、往复流、波流耦合及斜流等典型复杂水流对群桩绕流结构、涡旋演化、流速分布及局部冲刷的影响机制。研究表明,桩间干扰效应导致流场高度非均匀,局部流速加速与涡旋增强是诱发严重冲刷的关键因素。现有研究虽已揭示部分规律,但在多物理场耦合建模、极端工况响应及智能预测等方面仍需深入探索。未来应加强多学科融合与技术创新,推动群桩基础设计从经验导向向机理驱动转变,为海洋强国战略下的重大基础设施安全提供坚实保障。

参考文献

- [1]陈亚东,孔定新.桥梁群桩基础附近三维流场水动力特性试验研究[J].中国高新科技,2022,(16):58-63.
- [2]薛志翔.桥梁群桩基础承载性能研究[J].工程技术研究,2025,10(12):23-25.
- [3]金仁贵,吴文兵,陈力博.波流耦合作用下深水桥墩群桩基础动力响应研究[J].安全与环境工程,2025,32(03):136-142.
- [4]杨则英,孙芮,毕传龙,等.波流组合作用的大间距群桩基础冲刷试验研究[J].土木工程学报,2025,58(05):65-78.