

波流-桩体-海床动力耦合作用及其对单桩水平承载特性的影响

漆文刚, 胡存, 高福平

(中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 与传统陆上桩基不同, 海洋环境载荷的复杂性使得多物理场耦合效应成为刚性单桩基础承载力分析中的关键影响因素。着重分析了桩基周围局部流场诱导的海床冲刷及波浪诱导产生的海床孔压响应的影响。冲刷可导致桩基刚性增强, 而传统的 $p-y$ 曲线法由于未能考虑到刚性桩桩底面和侧面土阻力的影响, 计算所得结果偏于保守。波浪诱导的海床孔压响应可使得桩基周围土体中的有效应力急剧下降, 承载能力被大幅削弱, 可通过在非液化区的土体抗力前乘以折减系数的方法来计算液化后土体的抗力。刚性单桩基础在服役期中需要长期承受暴风和巨浪等循环载荷的作用, 导致地基土体产生复杂的循环动力响应, 塑性应变不断累积, 土体强度和刚度发生弱化。对于渗透系数较小的粉土, 需要关注加载速率和加载频率的影响。对波流-桩体-海床的多物理场耦合分析, 有助于科学揭示循环载荷下的单桩承载机制。

关键词 刚性单桩, 多物理场, 承载力, 循环载荷

1 引言

随着我国近岸和近海工程建设的发展, 海洋结构物的基础型式不断演化, 逐渐发展出桩基础、重力式基础、吸力式筒型基础、桩靴基础和板锚等多样化的基础型式(Randolph, 2011)。不同型式基础的承载机理和破坏失稳模式各不相同(Gao et al., 2015)。

桩基础是其中一种重要的海洋结构物基础, 广泛应用于近岸浅水条件。桩基础对地质条件和载荷环境的适应能力强, 具有结构型式简单、设计制造简便以及施工方便等优点, 在海上风机、海洋平台、跨海大桥等工程中得到广泛应用。在近年蓬勃发展的海上风电工程当中, 直径达 5-7 米的单桩基础(Monopile)应用广泛, 占到全世界已建成海上风机基础的 70% 以上, 在我国的如东风电场等实际工程中单桩基础也逐步开始应用, 且在渤海、东海等区域有着广阔的应用前景(黄维平等, 2009)。由于服役水深较浅, 桩基承载时受波浪作用的影响较为显著。桩基在台风巨浪等海洋环境载荷作用下发生失稳破坏的案例屡见不鲜(Chen et al., 2015), 对海洋环境中桩基承载和失稳的机理进行深入分析具有重要意义。

一般而言, 刚性单桩基础的竖向承载能力较易满足设计要求, 水平承载能力成为关键的控制因素(王国萃等, 2011)。本文首先对刚性单桩基础的水平承载力分析方法进行梳理, 重点阐述刚性桩与柔性桩的区别, 继而基于波流-桩体-海床动力耦合作用的相关研究进展, 分析多物理场耦合效应对单桩基础承载特性的影响

2. 刚性单桩基础的水平承载力分析方法

在水平荷载作用下, 根据变形模式的不同, 桩基可分为柔性桩和刚性桩两类。传统的海洋平台桩基础埋深较大, 在承受水平载荷时, 较深处的桩段几乎不发生变形, 属于柔性桩范畴; 而近年海上风机常用的大直径单桩基础的埋深一般相对较小, 在水平载荷作用下桩基出

现整体转动的变形模式，属于刚性桩范畴。

Poulos 和 Hull (1989)认为，当桩基埋深处于 $L_c/3 < L < L_c$ 的范围时，桩基变形模式逐渐从刚性桩过渡至柔性桩。 L_c 表示临界桩长，当桩基埋深超过临界桩长时，桩基埋深对桩基水平承载力没有影响。土性参数沿深度均匀分布时，临界桩长 L_c 的计算公式为

$$L_c = 4.44\sqrt{E_p I_p / E_s} \quad (1)$$

式中， $E_p I_p$ 表征桩基的截面抗弯模量， E_s 代表土体的压缩模量。据此，桩基变形模式从刚性桩过渡至柔性桩的判断条件为

$$4.8 < E_s L^4 / E_p I_p < 388.6 \quad (2)$$

式(2)表明，依据计算得到无量纲参数 $E_s L^4 / E_p I_p$ 值，即可对桩基的变形模式进行定性判定。刚性桩与柔性桩的水平承载机理有显著区别，已引起工程界和学术界的关注。

图 1 给出了水平荷载作用下柔性桩和刚性桩的变形示意图(见 Gao et al., 2015)。对于柔性桩，水平荷载引起的桩身弯矩和桩基位移仅限于桩基靠上的部分，桩基埋深对桩基响应几乎没有影响。而刚性桩在水平荷载作用下呈现整体转动，桩身存在一反弯点。

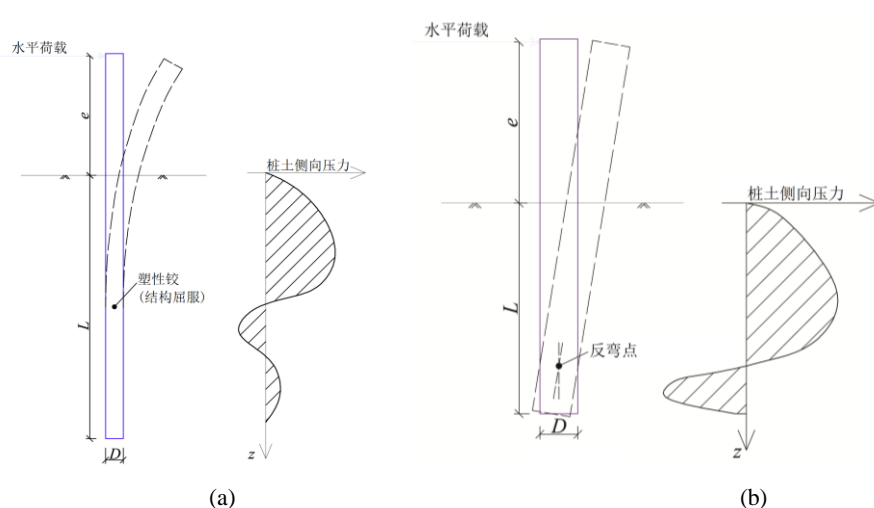


图 1 水平承载桩基的变形模式: (a) 柔性桩; (b) 刚性桩

研究桩基水平承载问题时，一般将桩基简化为弹性梁，将周围土体简化为沿桩身分布的一系列弹簧，通过建立弹性梁与周围弹簧之间的平衡关系，即可求解得到一定水平荷载下桩基的变形。根据对土体弹簧约束的不同描述，已发展出了一系列不同的计算方法：Hetenyi (1946)将土体约束简化为线性弹簧且认为弹簧刚度不随土体深度变化，得到了桩基加载点处位移的理论解；Reese et al. (1974)用 p - y 曲线(p 为单位长度的桩土侧向压力， y 为对应位置的桩基水平位移)来描述砂土中土体弹簧约束的力-位移关系，通过选取合理的 p - y 曲线，考虑了弹簧刚度的非线性及其随土体深度的变化。Reese et al. (1974)和 O'Neill et al. (1983)提出的 p - y 曲线因其概念清晰、简洁实用，已被 API(2011)和 DNV(2013)等海洋工程行业规范所采纳，是目前应用最广的桩基水平承载计算方法。然而该 p - y 曲线仅根据有限组次的原位实验数据而得到，实验中桩基直径为 0.61m (Cox et al., 1974)，直接应用于大直径单桩的水平承载力分析可能产生较大的计算误差(朱斌等, 2013; Choo et al., 2014)。

与柔性桩不同，刚性桩承载时桩基底面会受到来自于土体的剪切力和弯矩作用，同时桩基侧面也会出现沿桩身外壁竖向分布的土阻力。Bekken (2009)和 Byrne et al. (2015)的数值研

究结果表明刚性桩基底面和侧面受到的这些额外土阻力对桩基的位移等响应有重要影响。对介于柔性柱和刚性桩之间(见式(2))的桩基而言,计算其水平承载力时需对上述额外土阻力的影响进行考虑。

漆文刚和高福平(2016)给出了 p - y 曲线法和有限元模拟所得桩基位移之比 y_p/y_n 随参数 $E_s L^4/E_p I_p$ 的变化(见图 2), 其中 y_p 代表利用 p - y 曲线法所得桩基位移, y_n 代表有限元模拟所得桩基位移。当 $E_s L^4/E_p I_p > 50$ 时 y_p/y_n 的值约等于 1; 当 $E_s L^4/E_p I_p < 50$ 时 y_p/y_n 的取值随 $E_s L^4/E_p I_p$ 的减小而逐渐增大, 最大可达 1.8。图 2 中还给出了 Byrne et al. (2015)研究所得的数据点, 与漆文刚和高福平(2016)所得到的规律基本一致。图 2 表明, 当桩基刚性逐渐增大时, p - y 曲线法所得桩基位移较有限元模拟所得位移显著偏大, 这主要是由于桩基底面和侧面所受土阻力的影响逐渐凸显。这些影响在有限元模拟中能够得到完全的反映, 而传统的 p - y 曲线法在计算桩基响应时未能考虑这些土阻力的作用, 因而不适用于刚性较大的水平承载桩基响应分析。

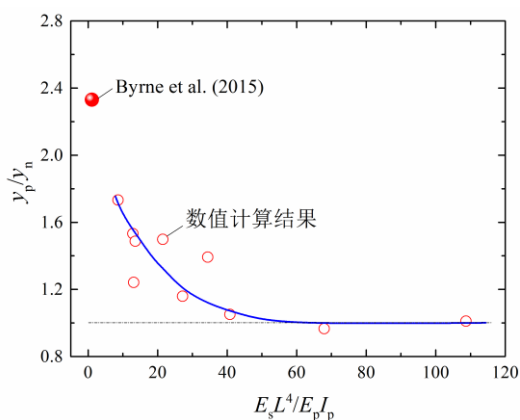


图 2 y_p/y_n 随无量纲参数 $E_s L^4/E_p I_p$ 的变化

3. 多物理场耦合对刚性单桩基础水平承载特性的影响

3.1 海床冲刷

准确预测极限平衡冲刷深度是桩基冲刷研究的关键问题之一。Sumer et al. (1992)基于模型试验数据, 提出了动床条件下特定砂土地基上无量纲极限冲刷深度(S/D)与 KC 数之间的经验关系: $S/D = 1.3[1 - \exp(-0.03(KC-6))]$, 其中 $KC \geq 6$ ($KC = U_{wm}T/D$, U_{wm} 为波浪诱导的水质点流速幅值, T 为波浪周期, D 为桩基直径)。该公式在海洋工程界应用广泛, 并被 DNV(2013) 规范采纳。但是通过对原始试验数据的分析, 发现试验数据点较为分散, 冲刷深度预测公式的精度较低。Qi 和 Gao(2014)的研究表明, 仅用 KC 数难以反映波流共同作用时的冲刷深度变化规律; 特别是对于水流作用占主导的情况, 此时 KC 数趋近无穷大, 难以有效反映来流特征; 进一步提出了基于 1/4 波浪周期平均流速的修正 Froude 数 Fr_a , 建立了极限平衡冲刷深度与该无量纲控制参数的分析模型: $\lg(S/D) = -0.80 \exp(0.14/Fr_a) + 1.11$, 其中 $0.1 < Fr_a < 1.1$; 该模型的预测精度显著优于基于 KC 数的经验模型。

冲刷使得桩基埋深减小, 同时水平载荷作用力臂增加(即相对于桩土界面处的弯矩载荷增大), 进而影响桩基变形和桩土间作用力的分布(见图 3)。目前已有的相关数值研究主要考虑了两方面的效应: 一是冲刷诱导的上部土体输移会导致剩余土体处于超固结状态, 从而改变其力学特性(Lin et al., 2010), 二是冲刷坑几何尺寸(如冲刷坑坡度)的影响(Lin et al., 2014)。

Qi et al. (2016)通过离心机实验对砂土中桩基水平承载的冲刷效应进行了研究。在鼓式离心机中制备了不同深度的局部冲刷坑及整体冲刷, 根据实验获得的 p - y 曲线, 提出土体有效深度(z_e)的概念进行冲刷后 p - y 曲线的计算, 从而考虑冲刷对 p - y 曲线的影响。 z_e 的计算公式为

$$\frac{z_e}{D} = \left(1 - \tanh\left(\frac{fz'}{D}\right)\right) \frac{z'}{D} + \tanh\left(\frac{fz'}{D}\right) \frac{z}{D} \quad \begin{cases} f \approx 1.5 & \text{for local scour} \\ f = 0 & \text{for general scour} \end{cases} \quad (3)$$

有效深度 z_e 是距离初始床面的土体深度 z 和距离冲刷后冲刷坑底部土体深度 z' 的加权平均值(见图 3)。 z 和 z' 的权重系数取值受冲刷坑形状影响, 同时随冲刷后深度 z' (当前实际深度) 而变化。参数 f 为一经验系数, 表征有效深度 z_e 从冲刷后泥面处 $z_e=z'=0$ 的取值, 随实际土体深度 z' 增加而过渡至 $z_e=z$ 的变化速率。

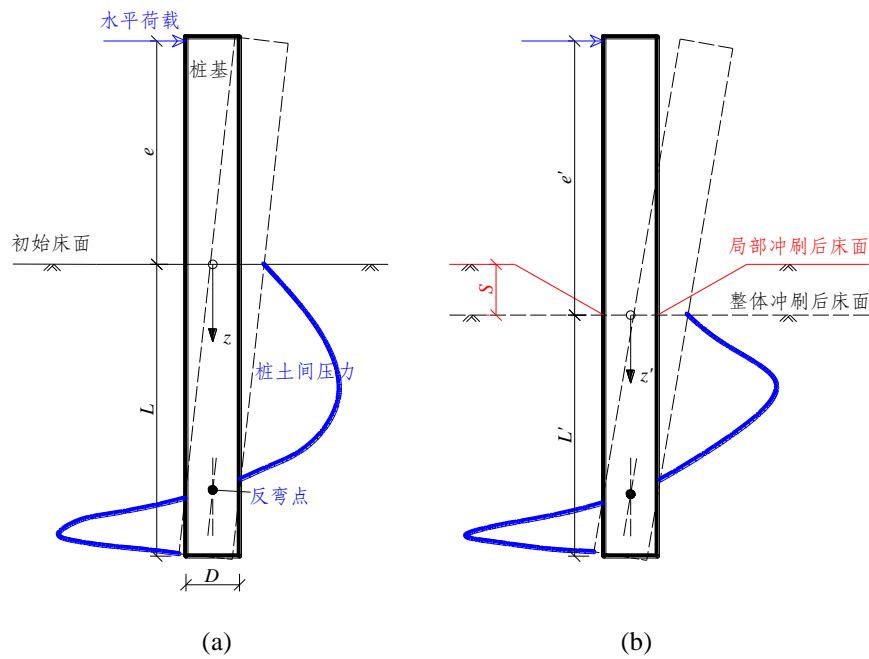


图 3 冲刷对桩基水平承载的影响示意: (a)冲刷前; (b)冲刷后

局部冲刷深度 S 与桩径 D 一般呈正相关, 用于海上风机基础的单桩直径与桩基埋深之比(D/L)一般较大(Qi and Gao, 2014), 从而冲刷深度可达桩基埋深的 25%, 即 $S/L \sim 0.25$ 。用 κ 表示参数 $E_s L^4 / E_p I_p$, 显然冲刷引起的桩基埋深减小会导致 κ 值的减小。用 L_s 表示冲刷后的桩基埋深, 用 κ_s 表示冲刷后 κ 的值, 则

$$\begin{aligned} \kappa_s &= E_s L_s^4 / E_p I_p \\ &= \kappa (1 - S/L)^4 \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(4), 可给出一系列初始 κ 值下 κ_s 随 S/L 的变化, 如图 4 所示。图 4 表明当冲刷深度为 $S/L=0.15$ 时, κ_s 的取值仅为 κ 的一半。对于 $\kappa \approx 50$ 的情况, 如果冲刷使得 $\kappa_s \approx 25$, 则从图 2 可以看出冲刷后的桩基响应已经难以用传统的 p - y 曲线法进行准确预测。此时传统的 p - y 曲线法不再适用, 而需在桩底和桩侧额外增加弹簧约束, 以考虑刚性桩基底面和侧面所受到的土阻力。

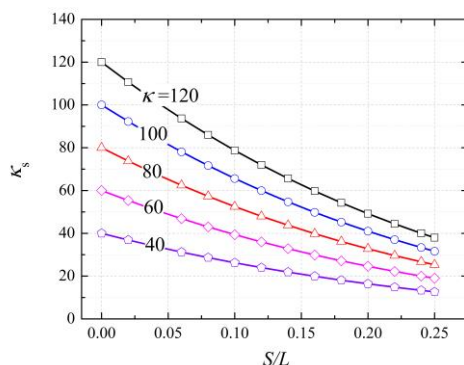


图4 不同 κ 取值条件下, 参数 κ_s 随无量纲冲刷深度(S/L)的变化

3.2 波浪诱导海床孔压响应

波浪循环荷载不仅导致桩基冲刷, 还会引起海床土体内超静孔隙水压的周期性瞬态响应和累积响应(Jeng 等, 2007), 甚至使海床发生液化。孔隙水压的时空变化, 使土骨架承受交变的孔隙水渗透力的作用, 而粉土的渗透系数小, 更易产生孔压累积。Wang et al. (2014)基于大型流固土耦合水槽物理模型试验, 初步研究了粉土海床液化触发和发展过程中的土体超静孔压动态演变过程和液化深度的扩展, 发现粉土液化后液化层随波浪发生振荡, 在水体和液化土体之间形成界面波, 土体经过液化和固结沉积后相对密度增加, 土体强度显著提升, 再次液化的难度增大。实际海洋环境中海床常常受到波浪和水流的共同作用, 波流共同作用下的海床孔压响应近年来逐渐引起学者关注。Zhang et al. (2013)用雷诺平均的 Navier-Stokes 方程计算波流相互作用, 用多孔弹性模型描述土体, 对波流共同作用时的土体孔压响应进行了计算分析, 结果表明水流的加载可使得液化深度增加 30%; 桩基的存在可使得桩基附近海床土体内的超静孔隙水压发生明显变化(Zhang et al., 2012), 在进行海床液化与桩基冲刷的关联分析时需进行考虑。

桩基循环水平承载时, 桩基周围海床土体发生液化(累积孔压增长)的可能动因有两方面: 波浪作用诱导的海床土体液化, 以及桩土循环作用引起的桩基附近土体液化(Cuđlar et al., 2014; 见图 5)。尽管两种动因导致土体发生液化的机理有所不同, 但是最终对桩基承载能力的影响当无本质差异。目前关于液化土体中桩基承载能力的研究主要关注地震载荷引起的土体液化(Rollins et al., 2005), 通过在非液化土的极限抗力前乘以折减系数来考虑液化后土体的抗力(王建华等, 2008)。借鉴地震液化土体中桩土相互作用的考虑方法, 合理反映桩基循环水平承载时土体液化的影响, 对于海洋工程桩基设计具有重要意义。

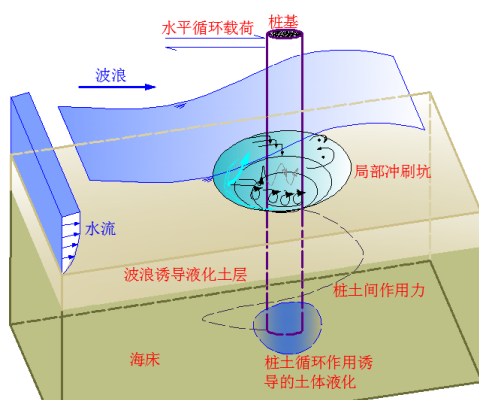


图5 桩基周围土体液化对桩基水平承载影响

3.3 循环载荷

海洋结构物基础往往受到循环水平载荷的长期作用,可能导致土体强度弱化和土体割线刚度衰减,桩基产生累积变形,进而危及结构安全。API (2011)规范中通过对静力 $p-y$ 曲线的峰值强度进行折减,考虑循环载荷作用下的桩基响应。该计算方法中并未考虑循环载荷水平及循环周次的影响,所得结果仅代表了循环水平载荷作用下桩基响应的包络线 (Cudlar, 2011); 同时,该方法所基于的桩基试验中循环加载周次基本在 200 次以内,对于更高周次的循环载荷下桩基响应预测具有较大的局限性 (Achmus et al., 2009)。国内相关设计规范(如《港口工程桩基规范-2012》)目前对循环水平环载荷作用下的桩基响应计算尚缺乏规定,多建议通过试验进行分析。

模型试验是研究循环水平载荷作用下桩土相互作用机理的重要手段。LeBlanc et al. (2009), 陈仁朋等(2012), Chen et al. (2015), 刘红军等(2015)针对砂土、粉土等不同的土性条件分别进行了常重力条件下的试验研究。研究表明循环加载使桩基周围土体产生累积塑性变形, $p-y$ 曲线的割线刚度和土体极限抗力 p_u 随循环次数增加不断下降 (见图 6); 桩身累积变形与循环次数的对数呈线性增长关系(Chen et al., 2015); 给出了不同循环次数和深度下粉土地基极限抗力的折减系数建议值(陈仁朋等, 2012)。Zhang et al. (2011), 朱斌等(2013)分别进行了软粘土和砂土中的桩基循环水平承载离心机试验。发现软粘土中的桩基极限承载力几乎不受循环加载历史的影响, 桩基-软粘土体系水平作用的割线刚度在一定循环次数后不再变化(Zhang et al., 2011); 对于砂土中的桩基, 循环水平载荷作用下桩身累积变形和弯矩近似与循环次数的对数线性相关, 通过折减桩基 $p-y$ 曲线能够对桩基循环变形和弯矩变化进行合理分析(朱斌等, 2013)。Chen et al. (2015)对高桩承台基础水平循环承载的群桩效应进行了试验模拟和分析, 发现在水平循环载荷作用下, 群桩基础的刚度退化更为显著。

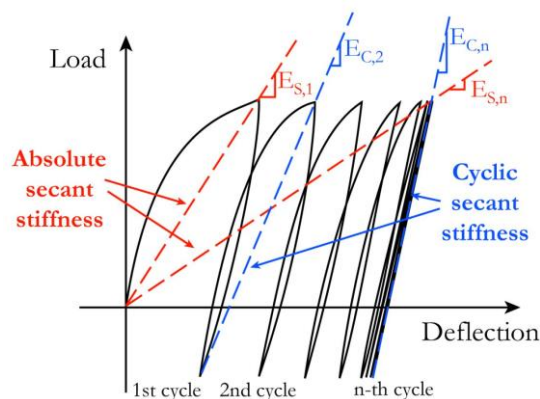


图6 循环水平载荷作用下的桩基响应

循环载荷的加载速率和加载频率对于桩土相互作用过程中土体的排水条件具有重要影响, 而已有的试验研究主要关注循环载荷水平 (最大值、幅值)、加载周次、加载时序 (载荷水平随加载周次的变化) 等因素, 对加载速率和加载频率影响的研究较为缺乏 (Cudlar, 2011)。对于渗透系数较小的粉土, 在较高的加载频率下桩基周围土体中极有可能出现超静孔压的累积, 削弱桩基的循环承载能力, 该问题有待基于模型试验和基于土体动本构的数值模型进行深入研究。

桩基循环承载数值方面的研究主要分为三个方向, 一是基于土单元的循环三轴试验结果, 建立单元土体参数与当前应力水平和循环周次的经验关系, 然后建立考虑土体参数变化

的有限元模型进行分析。例如, Achmus et al. (2009)和胡安峰等(2014)利用土体割线刚度循环衰减模型对桩基的循环水平响应进行了数值研究,发现当循环荷载较小时,桩基泥面处的水平位移随循环次数的增大而增大,达到一定循环次数后趋于平稳,当循环荷载超过一定大小后,泥面处的水平位移急剧发展,且不再稳定。二是直接利用土体动本构模型进行分析 (Cudlar, 2014),此种分析方法物理意义较为明确,对于揭示桩土循环作用的机理具有重要价值,但是建模计算过程较为复杂,对于循环周次较大(如10000周次以上)的工况所需计算资源较大。三是基于精确控制和测量的室内试验结果,量化描述桩土长期循环作用下桩基附近局部土体土性参数的变化及几何边界的变化 (Cudlar, 2011),进而建立数值模型结果,可对长期循环荷载作用后桩基的承载能力进行分析 (Ma et al., 2017)。该方法具有物理意义直观和简单易用的优点,但是计算结果强烈依赖试验结果的准确性,且难以考虑荷载水平和循环周次的影响。

4. 结论与展望

对于海洋环境中服役的刚性单桩基础,波流-桩体-海床动力耦合作用对单桩的承载性能具有重要影响。对刚性单桩基础的水平承载力分析方法进行了梳理,指出随着桩基从柔性桩逐渐向刚性桩变化,传统的 p - y 曲线法由于未能考虑到刚性桩桩基底面和侧面土阻力的影响,计算所得结果偏于保守。分析了桩基周围海床局部冲刷对单桩水平承载力的影响,利用有效深度的概念可考虑冲刷对 p - y 曲线的影响,冲刷还会导致桩基的刚性进一步增加,使得传统 p - y 曲线法分析冲刷后桩基响应的精度降低。波浪诱导的海床孔压响应可使得桩基周围土体中的有效应力急剧下降,承载能力被大幅削弱,可借鉴地震液化土体中桩土相互作用的考虑方法,通过在非液化区的土体抗力前乘以折减系数的方法来计算液化后土体的抗力。对桩基循环承载的试验研究进行了总结,指出对于渗透系数较小的粉土,需要关注加载速率和加载频率的影响,最后对桩基循环承载的数值分析方法进行了分类总结。

波流-桩体-海床动力耦合作用是一个复杂的多物理过程,难以用一个单独的耦合模型进行全面考察,而需针对不同的问题侧面进行适当取舍。通过对复杂问题的解耦,最终提出能够考虑冲刷、液化等“流固土耦合”效应的桩基水平承载分析模型,对于海洋工程建设中的桩基设计及安全评估具有重要意义。同时,研究成果对其它形式海洋工程基础结构也具有参考价值。

致谢: 本研究得到国家自然科学基金项目(11602273, 11232012, 51309213)资助。

参考文献

- [1] Achmus M, Kuo YS, Abdel-Rahman K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(5): 725-735.
- [2] American Petroleum Institute. *Geotechnical and foundation design considerations, ANSI/API Recommended Practice 2 GEO First Edition*, April 2011.
- [3] American Petroleum Institute. *Geotechnical and foundation design considerations, ANSI/API Recommended Practice 2 GEO First Edition*, April 2011.
- [4] Bekken L. Lateral behavior of large diameter offshore monopile foundations for wind turbines. Dissertation for Doctoral Degree. TU Delft: Delft University of Technology, 2009
- [5] Byrne B W, McAdam R, Burd H J, et al. New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications. *Proceedings of 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*. Oslo: CRC Press. 2015
- [6] Chen R, Sun Y, Zhu B, et al. Lateral cyclic pile-soil interaction studies on a rigid model monopile. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 2015, 168(2): 120-130.
- [7] Chen Y, Gu M, Chen R, et al. Behavior of pile group with elevated cap subjected to cyclic lateral loads. *China Ocean Engineering*, 2015, 29: 565-578.
- [8] Choo Y W, Kim D, PARK J H, et al. Lateral response of large-diameter monopiles for offshore wind turbines from

- centrifuge model tests. *Geotech Test J*, 2014, 37(1):1-14
- [9] Cox W R, Reese L C, Grubbs B R. Field testing of laterally loaded piles in sand. Proceedings of 6th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1974, paper no. OTC 2079
- [10] Cuđlar P, Mira P, Pastor M, et al. A numerical model for the transient analysis of offshore foundations under cyclic loading. *Computers and Geotechnics*, 2014, 59: 75-86.
- [11] Cuđlar P. Pile Foundations for offshore wind turbines: numerical and experimental investigations on the behaviour under short-term and long-term cyclic loading. (PhD thesis) Technical University of Berlin; 2011.
- [12] Det Norske Veritas. Offshore standard DNV-OS-J101. Technical Standard, 2013.
- [13] Gao FP, Li JH, Qi WG, et al. On the instability of offshore foundations: theory and mechanism. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(12): 1-17.
- [14] Hetenyi M. Beams on elastic foundations. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1946
- [15] Jeng DS, Seymour B, 高福平, 吴应湘. 波浪荷载下海床土体孔隙水压的瞬态与累积响应机理. *中国科学(E 辑)*, 2007, 37(1): 91-98.
- [16] LeBlanc C, Houlsby GT, Byrne BW. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading. *Geotechnique*, 2009, 60(2): 79-90.
- [17] Lin C, Bennett C, Han J, et al. Scour effects on the response of laterally loaded piles considering stress history of sand. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(7): 1008-1014.
- [18] Lin C, Han J, Bennett C, et al. Analysis of laterally loaded piles in sand considering scour hole dimensions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(6): 04014024.
- [19] Ma HW, Yang J, Chen LZ. Numerical analysis of the long-term performance of offshore wind turbines supported by monopoles. *Ocean Engineering*, 2017, 136: 94-105.
- [20] O'Neill MW, Murchison JM. An evaluation of p-y relationships in sands. Department of Civil Engineering, University of Houston, TX. Research Rep. 1983, No. GT-DF02-83..
- [21] Poulos, H., Hull, T. 1989. The role of analytical geomechanics in foundation engineering. In *Foundation engineering: Current principles and practices*, Reston, VA: ASCE 2: 1578-1606.
- [22] Qi W G, Gao F P. Physical modeling of local scour development and pore pressure response around a large-diameter monopile in combined waves and current. *Coast Eng*, 2014, 83: 72-81
- [23] Qi WG, Gao FP. Equilibrium scour depth at offshore monopile foundation in combined waves and current. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(5): 1030-1039.
- [24] Qi, WG., Gao, FP., Randolph, MF., Lehane, BM. Scour effects on the p-y curves of shallowly-embedded piles in sand. *Geotechnique*. 2016, 66:1-13.
- [25] Randolph MF, Gourvenec S. *Offshore Geotechnical Engineering*. New York: Spon Press, 2011
- [26] Reese LC, Cox WR, Koop FD. Analysis of laterally loaded piles in sand. *Offshore Technology in Civil Engineering Hall of Fame Papers from the Early Years*, 1974: 95-105.
- [27] Rollins KM, Gerber TM, Lane JD, et al. Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(1): 115-125.
- [28] Sumer BM, Fredsøe J, Christiansen N. Scour around a vertical pile in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1992, 118(1): 15-31.
- [29] Wang, YF., Gao, FP., Qi, WG. Cyclic pore pressure generation in silty soils under the action of combined waves and current. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*. 2014, 45(4): 40-45.
- [30] Zhang C, White D, Randolph M. Centrifuge modeling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137: 717-729.
- [31] Zhang JS, Zhang C, Jeng DS. Three-dimensional model for wave-induced dynamic pore pressure around monopile foundation. *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*. AIP Publishing, 2012, 1479(1): 1472-1475.
- [32] Zhang JS, Zhang Y, Zhang C, et al. Numerical modeling of seabed response to combined wave-current loading. *International Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2013, 135(3): 031102.
- [33] 陈仁朋, 顾明, 孔令刚, 等. 循环水平荷载下高桩基础受力性状模型试验研究. *岩土工程学报*, 2012, 34(11): 1990-1996.
- [34] 港口工程桩基规范, JTS 167-4. 2012
- [35] 胡安峰, 张光建, 贾玉帅, 等. 刚度衰减模型在大直径桩累积侧向位移分析中的应用. *浙江大学学报: 工学版*, 2014 (4): 721-726.
- [36] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势. *海洋工程*, 2009, 27(2): 130-134.
- [37] 刘红军, 张冬冬, 吕小辉, 等. 循环荷载下饱和粉土地基单桩水平承载特性试验研究. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2015, 1: 012.
- [38] 刘晋超, 熊根, 朱斌, 等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性. *岩土力学*, 2015, 36(2): 591-599
- [39] 漆文刚, 高福平. 冲刷对海上风力机单桩基础水平承载特性的影响. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2016, 46(12):124710.
- [40] 王国粹, 王伟, 杨敏. 3.6 MW 海上风机单桩基础设计与分析. *岩土工程学报*, 2011, 33(增刊 2): 95-100
- [41] 王建华, 戚春香, 余正春, 等. 弱化饱和砂土中桩的 p-y 曲线与极限抗力研究. *岩土工程学报*, 2008, 30(3): 309-315.
- [42] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807-1815.

WAVE/CURRENT-PILE-SEABED INTERACTION AND ITS EFFECTS ON HORIZONTAL BEARING BEHAVIOR OF MONOPILE FOUNDATIONS

QI Wengang HU Cun GAO Fuping

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Contrast to the traditional onshore pile foundations, the bearing behavior of offshore rigid monopile foundations is much more complex due to the multi-physical coupling effects under current and waves. The effects of local scour and pore-pressure response in the seabed around the monopiles are reviewed and analyzed. The monopile foundations must confront the action of cyclic loadings during the service, e.g. storm wind and huge wave. Complex soil responses will be generated by the cyclic loadings. The plastic strain is accumulated and the soil strength is gradually reduced. Analysis of the multi-physical interaction of current/wave-pile-seabed is beneficial to reveal the bearing mechanism of monopile foundations under cyclic loadings.

Key words monopile foundation, p - y curves, scour, pore pressure