

PLAXIS 3D 海上风电单桩分析与 p-y 曲线提取

筑信达 郭晓通

1. 概述

海上风电单桩基础是一种大直径开放式钢管桩，依靠桩周土体的刚度和强度抵抗外部风和波浪荷载。相较于导管架、重力式或吸力筒等形式的基础，单桩基础结构简单、施工效率高、经济性好，是当前全球海上风电场应用最广泛的基础形式之一。

目前用于单桩基础设计的传统方法主要基于美国石油协会（API）的设计规范，采用 Winkler 梁模型进行计算。在 API 规范中，沿着桩深分布的水平土反力通过非线性 p-y 曲线进行描述，p 表示水平土反力，y 表示桩的水平位移。API 规范方法最初是为油气行业中的导管架桩（jacket pile）设计而制定，并基于桩径小于 1 米的细长桩试验进行校准。而海上风电单桩的直径通常在 4 到 6 米，甚至更高，单桩的嵌入长度与直径比（L/D）通常在 4 到 8 之间，因此传统的 API 规范方法通常不适用于大直径单桩结构。在最新版本的 DNV-GL 指南中，已建议对用于单桩设计的 p-y 曲线应通过有限元分析（FEM）进行验证。

PISA 项目（PISA Joint Industry Project）提出了一种面向海上风电大直径水平受力单桩的新的设计方法。这种方法可以称为“PISA 方法”，“PISA 方法”是一种基于铁木辛柯（Timoshenko）梁模型的一维设计方法，并通过现场试验或三维有限元方法进行模型的校准。PLAXIS 也推出了基于 PISA 方法的设计软件“PLAXIS Monopile Designer”。

PLAXIS 作为岩土工程通用的有限元分析软件包，广泛用于海洋平台、海上风电相关的各类基础-土相互作用问题的分析。本文主要介绍采用 PLAXIS 3D 进行海上风电单桩建模及 p-y 曲线提取的方法。

2. 有限元模型创建

2.1 几何模型

海上风电单桩分析的典型几何模型如图 2-1 所示。由于对称性，可取整个单桩体系的一半进行模型创建。模型主要由土层、单桩、桩-土接触面、桩周加密区四部分组成。

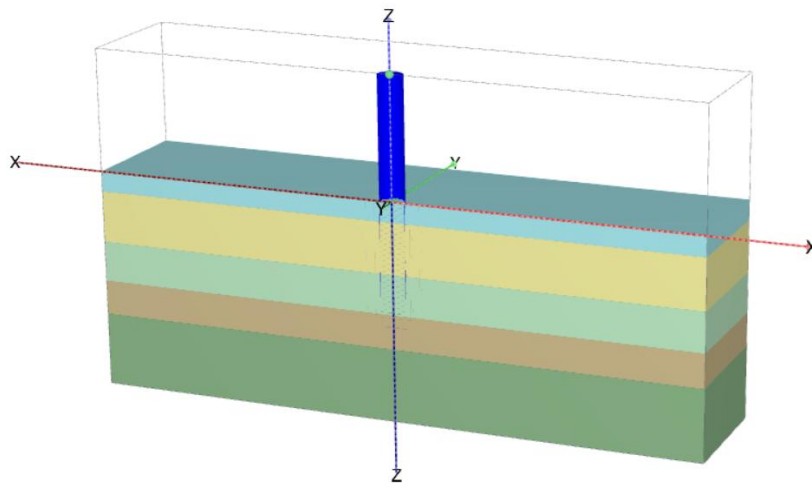


图 2-1 海上风电单桩分析的几何模型

其中，土层模型可以使用 PLAXIS 3D 钻孔工具进行快速创建。为了消除模型边界对分析的影响，模型的水平范围建议 X 方向和 Y 方向分别取 15 倍和 4 倍以上的桩外径。如需考虑不排水土层-单桩相互作用下的超静孔隙水压力，建议在此基础上适当增加模型范围。

土层模型中的水位可根据计算需求简化处理，如无需考虑土体的孔隙水压力变化，水位取到土层底部以下即可，此时在土层材料定义时，重度部分应取有效重度（浮重度），否则应按实际的海平面相对高程进行水位高程的输入，此时在土层材料定义时，重度部分应取饱和重度。

单桩采用板单元模拟。在单桩建模时，应同时创建泥线以下单桩内部土体，并将单桩及其内部土体沿深度方向进行切片，切片厚度即为后续 P-Y 曲线的取值间隔。桩-土之间应添加界面单元模拟其接触关系。为了提高建模效率，桩、桩内部土体、桩-土间界面单元的建模可以使用 PLAXIS 3D 隧道设计器。除了沿深度方向的切片外，在隧道设计器内可以将单桩沿周长方向进行分割（图 2-2 右图），这样可以保证桩上有足够数量且均匀分布的节点，方便进行计算结果的后处理。

此外，为了保证桩-土接触区域内有足够数量的节点，可以同时也在桩外侧一定范围内创建网格加密区（图 2-2 左图）。

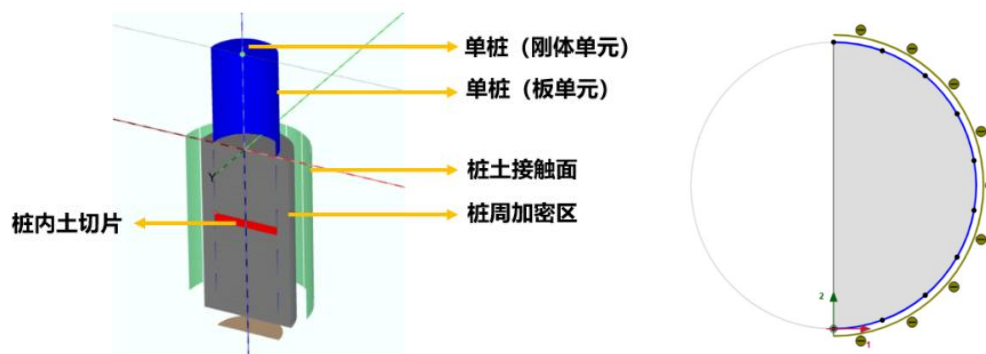


图 2-2 单桩结构细部模型示意图（左）与隧道设计器中的单桩截面（右）

2.2 岩土体本构模型与参数

海上风电单桩分析中推荐使用的岩土体本构模型包括：小应变刚度硬化模型（HS-small）、NGI-ADP 模型、摩尔-库伦模型、UDCAM-S 模型、SANISAND 模型等。

无论砂土、黏土，均可使用摩尔-库伦模型。摩尔-库伦模型的主要优势点在于参数简单、计算速度快，且能较好地反映土体强度。其中砂土的排水类型应设置为排水，使用摩尔-库伦破坏准则，此时土体的抗剪强度受有效粘聚力 c' 和内摩擦角 φ' 控制；黏土的排水类型应设置为不排水 B，使用特雷斯卡屈服准则，此时土体的抗剪强度受不排水抗剪强度参数 S_u 和 S_u 随深度的增量 S_u^{inc} 来控制。

表 2-1 砂土参数表

G_0^{ref}	$G_0 / [(c' \cdot \cos \varphi' - \sigma_3' \cdot \sin \varphi') / (c' \cdot \cos \varphi' + p_{ref} \cdot \sin \varphi')]^m$
RD	$100 \cdot (G_0^{ref} - 60000) / 68000$ (%)
E_{50}^{ref}	$60000 \cdot RD / 100$
E_{oed}^{ref}	$60000 \cdot RD / 100$
E_{ur}^{ref}	$180000 \cdot RD / 100$
$\gamma_{0.7}$	$(2 - RD / 100) \cdot 1E-4$
R_f	$1 - RD / 800$
K_0^{nc}	$1 - \sin \varphi$

G_{ur} / S_u^A	$G_0 / [(S_u^{bottom} + S_u^{top}) / 2]$
$S_{u,ref}^A$	S_u^{top}
$S_{u,inc}^A$	$(S_u^{bottom} - S_u^{top}) / (Z_{top} - Z_{bottom})$
Z^{ref}	Z_{top}
S_u^P / S_u^A	0.5
S_u^{DSS} / S_u^A	$(1 + S_u^P / S_u^A) / 2$
γ_f^C	$60 \cdot 100 / (G_{ur} / S_u^A)$
γ_f^E	$2 \cdot \gamma_f^C$

砂土静力分析的推荐本构模型为小应变刚度硬化模型（HS-small）。小应变刚度硬化模型可以更好地反映砂土刚度伴随着应力水平的变化及砂土的塑性行为。HS-small 模型的完整参数获取需要进行排水三轴压缩试验，在使用 HS-small 模型模拟砂土时，可以使用简化的参数输入模式：首先根据土体的剪切模量值计算 100kpa 参考应力水平下的剪切模量 G_0^{ref} ，再根据 G_0^{ref} 计算砂土的相对密度 RD（或者直接按实测的 RD 进行计算），随后将 RD 转换为 E_{50}^{ref} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 等刚度参数。砂土参数与 HS-small 模型完整参数的转换关系^[1]如表 2-1 所示。

γ_r^{DSS}	$1.5 \cdot \gamma_r^C$
T_0 / s_u^A	$-0.5 \cdot (1 - K_0) \cdot \sigma_{v0}' / s_u^A$

表 2-2 黏土参数表

如需分析砂土的动力响应，推荐使用 PLAXIS 3D 自定义本构模型库中的 SANISAND 本构模型，该本构模型可以很好地模拟砂土在循环荷载作用下的排水响应和刚度变化。

黏土的静力分析推荐本构模型为 NGI-ADP 模型。NGI-ADP 本构模型是一个不排水黏土的各向异性应力-应变-强度模型，可以考虑由成因机制、应力历史、不排水应力路径等因素引起的黏土中的各向异性行为。完整的 NGI-ADP 模型参数获取需要进行三轴压缩试验、三轴拉伸试验、直剪试验。在使用 NGI-ADP 模型模拟黏土时，同样可以使用简化的参数输入模式。首先根据土体的剪切模量值计算剪切模量与三轴压缩试验中不排水抗剪强度的比 G_{ur} / s_u^A ，再根据 s_u^A 和 G_{ur} / s_u^A 值计算 γ_r^C 、 γ_r^E 、 γ_r^{DSS} 等刚度参数。黏土参数与 NGI-ADP 模型完整参数的转换关系^[2]如表 2-2 所示。

如需分析黏土在循环荷载作用下考虑孔压累积效应的等效 NGI-ADP 参数，可使用 UDCAM-S 模型。

对于桩-土间接触面的行为，砂土可以使用默认的“从相邻土”选项，也可以单独为界面单元定义其本构模型及材料参数。黏土如使用 NGI-ADP 模型，无法使用“从相邻土”选项，因为 NGI-ADP 模型无拉伸-截断方程，无法考虑桩-土间脱开的情况，所以建议使用接触面材料的自定义模式，用摩尔-库伦模型来模拟界面行为。

2.3 桩上的荷载施加

模型的网格划分、边界条件均可采用默认选项，无需特殊设置。

单桩上外部荷载的施加通常借助刚体单元属性来完成。如图 2-3 所示，PLAXIS 中允许定义在刚体单元上定义一个参考点的坐标 X_{ref} 、 Y_{ref} 、 Z_{ref} ，以及在该参考点位置处不同方向上的转换、旋转条件。

一般地，如在桩顶位置施加上部结构传递的力和力矩，则将转换条件 X 设置为指定力，旋转条件 Y 设置为力矩，如需在桩顶位移施加指定的位移来计算桩-土响应，则将转换条件 X 设置为指定位移。X 和 Z 方向上的转角和 Y 方向上的位移需要进行约束。

如需考虑循环荷载效应，可以在刚体单元上直接施加外部动力荷载，目前 PLAXIS 3D 支持在刚体单元上定义动力位移荷载，数据类型可以选择为位移、速度、加速度三种。通过刚体单元属性列表中的 Multiplier 选项进行定义（图 2-3）。

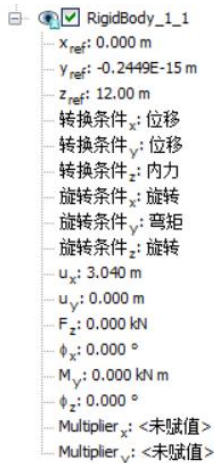


图 2-3 刚体单元设置

3. 有限元模型结果提取

对于单桩，默认的 PLAXIS 3D 结果是模拟单桩的板单元的位移和内力结果，如需将桩简化为梁，提取桩中心线上的等效结果，则需将结果数据进行提取并进行二次处理。

3.1 桩-土作用曲线

土反力（p）与桩挠度（y）之间的关系曲线可以通过提取桩身板单元和桩-土接触的界面单元上的结果进行计算。p-y 曲线的计算间隔与建模时定义的竖向切片厚度保持一致。

其中，每个切片上的桩挠度（y）计算可通过将桩身板单元上所有节点的水平位移结果取平均值来获取。即：

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ux_i$$

其中， Ux_i 为板单元上每个节点的水平位移。

每个切片上土反力（p）的计算可以通过提取界面单元上应力点的法向、切向应力结果并进行二次处理获取。

如图 2-4 所示，对于桩-土接触面上的每个单元，内部包含 6 个应力点（高斯积分点），每个应力点位置处可以提取该点桩-土作用的法向应力 σ_n 和切向应力 τ ，将法向应力和切向应力投影到水平方向，则每个单元上桩受到的土体水平牵引应力 $\sigma_{element}$ 可以由以下公式计算：

$$\sigma_{element} = \sum_{stress\ point=1}^6 (\sigma_n \cdot \cos\theta + \tau \cdot \sin\theta) \cdot w_i$$

其中， θ 为应力点与水平方向的夹角， w_i 为每个高斯积分点的权重值。
每个切片上的土反力（ p ）为各单元水平牵引应力 $\times$ 单元面积的合力：

$$F = \sum_{element=1}^n \sigma_{element} \cdot S_n$$

其中， S_n 为单元面积。

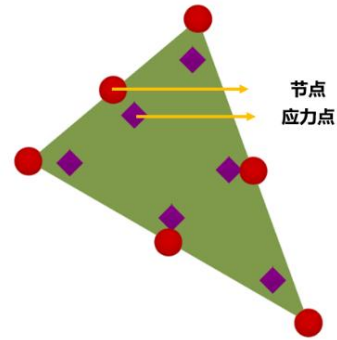


图 3-1 界面单元上的高斯积分点

3.2 转角、内力结果

考虑每个高程位置上桩绕着中心线发生转动，桩该高程处的转角 θ 可以通过最小二乘法拟合桩身位移进行计算：

$$\theta_{rad} = \frac{\sum_1^n (x - \bar{x})(u - \bar{u})}{\sum_1^n (x - \bar{x})^2}$$

其中， x 为节点的位置（坐标）， $\bar{x}$ 为节点坐标的平均值， u 为节点位移， $\bar{u}$ 为节点位移的平均值。

考虑单桩的内力为桩虚拟中心线上的等效内力，则桩沿深度的剪力可以由桩顶位置的外力和每个切片位置处的土反力叠加获得：

$$Q_z = F + \int_0^z p \cdot dz$$

其中 F 为桩顶位置的外力， p 为每个切片处的土反力。

桩沿深度的弯矩值由桩顶位置的力、力矩与每个切片位置的土反力形成的力偶矩叠加获得：

$$M_z = F(h + z) + M + \iint_0^z p \cdot dz$$

4. 使用 PLAXIS Offshore Toolbox 进行单桩计算

为了方便用户使用 PLAXIS 3D 进行单桩的有限元分析工作，筑信达在基于 PLAXIS 3D 二次开发的 PLAXIS Offshore Toolbox 程序中，提供了单桩计算模块，该模块可以用于海上风电大直径单桩基础的参数化建模及结果提取。

模块分为两个模式，分别为【模型】和【结果】。

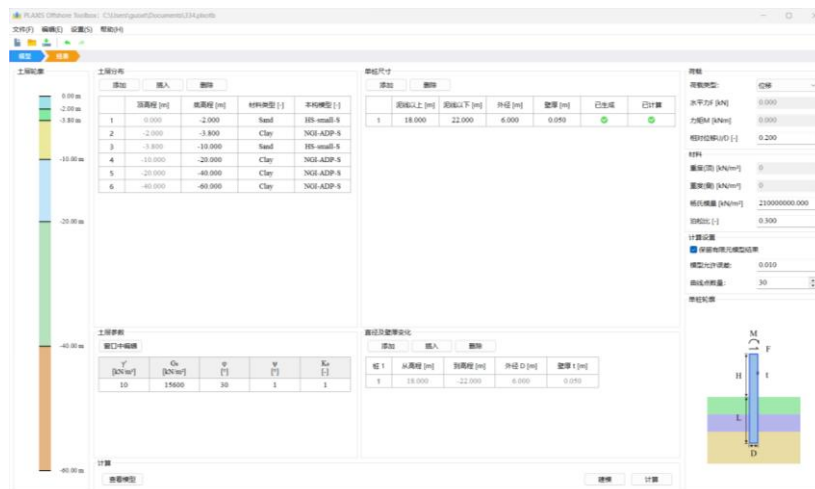


图 4-1 PLAXIS Offshore Toolbox 用户界面-参数输入

在【模型】模式中，用户应定义与模型创建和计算相关的输入条件（图 4-1）。包括：土层分布及各土层的岩土力学参数；定义多组单桩的尺寸及每组尺寸对应的桩径/壁厚变化；桩身材料及桩顶位置的指定荷载、位移；有限元计算相关的结果控制参数。定义完成后，程序将调用 PLAXIS 3D，并针对用户定义的各项桩尺寸进行批量的建模、计算、结果提取。

在【结果】模式中，用户可以查看定义的每组单桩对应的计算结果，包括 p - y 曲线结果、位移和转角沿深度的变化曲线结果、弯矩和剪力沿深度的变化曲线结果。（图 4-2）

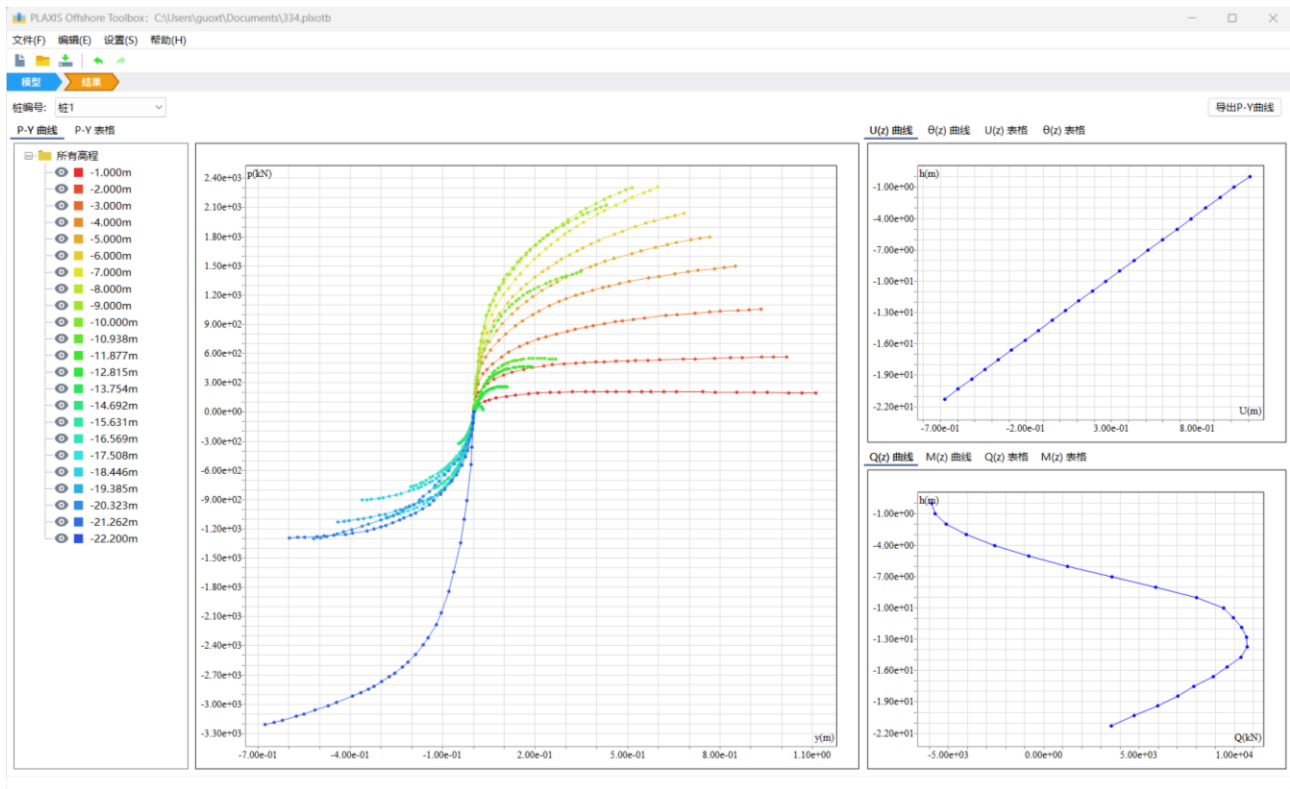


图 4-2 PLAXIS Offshore Toolbox 用户界面-结果查看

4、小结

本文主要围绕海上风电单桩基础的 PLAXIS 3D 有限元建模流程进行了系统性介绍。主要内容包括包含土层、单桩、桩-土界面和桩周加密区域的几何模型创建；模型的边界范围与水位设置；本构模型的选择、简化的参数输入与换算方法；模型的网格划分、边界条件及荷载施加方式等。随后，对有限元模型的结果后处理方法进行了介绍，包含 p - y 曲线的后处理方式、桩身转角与内力的计算方法等。最后，介绍了筑信达专用工具 PLAXIS Offshore Toolbox 中单桩模块的功能特性。

通过基于 PLAXIS 3D 的有限元分析，可实现对海上风电大直径单桩基础桩-土相互作用的精细模拟。为海上风电单桩基础的科学研究、性能评估、优化设计等提供了有效的技术路径。

参考资料

- [1] Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Engin, H.K. (2010). Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands. 7th NUMGE, Trondheim, Norway.
- [2] Jardine, R., Chow, F., Overy, R. (2005). ICP design methods for driven piles in sands and clays. Thomas Telford, London.
- [3] Murphy, G., Igoe, D., Doherty, P., & Gavin, K. (2018). 3D FEM approach for laterally loaded monopile design. Computers and Geotechnics, 100, 76-83.
- [4] PLAXIS Monopile Designer Manual [M] Bentley System.