引用格式：王文杰，黎鹏飞．海上风电大直径单桩基础桩-土相互作用分析优化设计方法研究与应用[J]．工业建筑，2026，56(4)：225-232.
WANG Wenjie，LI Pengfei. Research and Application on Pile-Soil Interaction Analysis and Optimized Design Method for Offshore Wind Power Large-Diameter Monopile Foundations[J]. Industrial Construction，2026，56(4)：225-232 (in Chinese). DOI：10. 3724/j. gyjzG23082104

海上风电大直径单桩基础桩-土相互作用分析优化设计方法研究与应用

王文杰　黎鹏飞
（深圳中广核工程设计有限公司，广东深圳　518172）

摘　要　单桩基础是被广泛使用的海上风电基础形式，中国海域的海床条件、严苛的环境荷载以及不断向深远海发展的进程使大直径长单桩更多地被应用在近海浅水地区的风电场。目前国内单桩基础设计主要采用 p-y 曲线法，该方法基于小直径柔性长桩试验得来，低估大直径单桩桩-土相互作用的刚度和承载力，增大了建造成本和施工难度。通过对比国外主流的单桩基础设计方法，建立了海上风电大直径单桩基础改进型桩-土相互作用分析优化设计方法。该关键技术基于挪威岩土所(NGI)提出的多弹簧分析模型，结合原位孔压静力触探(CPTU)试验以及高级土工试验的结果，可以更加精准地模拟桩-土相互作用效应，实现海上风电大直径单桩基础的精细化设计。

关键词　海上风电；大直径单桩；桩土相互作用；多弹簧模型

Research and Application on Pile-Soil Interaction Analysis and Optimized Design Method for Offshore Wind Power Large-Diameter Monopile Foundations

WANG Wenjie　LI Pengfei
(*China Nuclear Power Design Co.*, *Ltd.*, (*Shenzhen*), *Shenzhen* 518172, *China*)

Abstract: Monopile is a widely-used foundation form for offshore wind power. The seabed conditions in the sea area of Guangdong, harsh environment loads, and continuous development into deeper seas have lead to the wider application of large-diameter monopiles in offshore wind farms in shallow water area. At present, the monopile foundation design in China mainly adopts the p-y curve method. This method is based on the test of small-diameter long flexible piles, which underestimates the stiffness and bearing capacity of large-diameter monopile pile-soil interaction and increases construction costs and construction difficulties. By comparing the mainstream monopile foundation design methods in Europe, an improved pile-soil interaction analysis and optimized design method for large-diameter monopile foundations in offshore wind power has been established. The key technology is based on the multi-spring model proposed by NGI, combined with the results of in-situ CPTU tests and geotechnical tests, which can more accurately simulate the pile-soil interaction effect and achieve refined design of large-diameter monopile foundations for offshore wind power.

Keywords: offshore wind power; large-diameter monopile; pile-soil interaction; multi-spring model

单桩是海上风机最常使用的基础形式，考虑到国内海域的海床条件多为砂土互层土质以及包括高频次台风在内严苛的环境荷载，大直径长单桩被更多地应用在近海浅水地区的风电场。国内单桩

第一作者：王文杰，硕士，工程师，主要从事海上风电基础设计工作。
电子信箱：freddiex@163. com
收稿日期：2023-08-21

© 2026 工业建筑

基础设计的主要依据还是参照NB/T 10105—2018《海上风电场工程风电机组基础设计规范》[1]，规范中对于桩基础水平承载力及变形计算主要采用美国石油协会（API）的p-y曲线法，将桩简化为多节点的连续梁模型，土体抗力与变形可由非线性弹簧来模拟。该方法基于小直径柔性长桩试验得来，忽略了基底剪力、反力弯矩等额外抗力贡献，同时忽略了桩周土破坏模式的转变，因此严重低估了大直径单桩桩-土相互作用的刚度和承载力，增大了建造成本和施工难度。

除p-y曲线法外，国外使用的大直径单桩基础设计方法还包括有限元法以及桩土分析方法（Pile Soil Analysis，PISA方法），但有限元法需要精确的岩土参数，且建模及建立接触面的过程复杂，难度大，计算成本高；PISA方法有地域的局限性，研究成果仅能直接用于欧洲北海地区与测桩试验类似地质条件的场地的大直径单桩基础的概念设计。

本文通过对比国外主流的单桩基础设计方法，建立了海上风电大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型，并将该模型应用在广东海域某风电场的大直径单桩基础的设计中。该关键技术基于挪威岩土所（NGI）提出的多弹簧分析模型，结合原位孔压静力触探（CPTU）试验以及高级土工试验的结果，可以更加精准地模拟桩-土相互作用效应，实现海上风电大直径单桩基础的精细化设计。

1　大直径单桩常规岩土设计方法

大直径单桩基础主要受到水平荷载以及由水平荷载引起的倾覆弯矩的共同作用。一般来说，规范推荐的设计方法建议以简化的Winkler梁-弹簧模型来描述桩土相互作用。桩基础被简化离散为一系列的梁单元，每个梁单元的节点处连接一个土弹簧（或土抗力曲线），地基土体对桩基础的作用力由桩身分布的一系列相互独立的土弹簧代表。欧洲的大直径单桩设计常根据风电场开发商的偏好、项目的时间限制以及可使用的岩土勘察数据从下列方法中选择一种或几种方法确定土体抗力曲线来进行设计：

1）API方法。

在海洋工程领域，API规范[2]推荐的p-y曲线法长久以来被广泛应用于导管架深长钢管桩基础的设计。规范针对砂土和黏土分别推荐了土体抗力曲线，即p-y弹簧的计算方法（图1、2）：

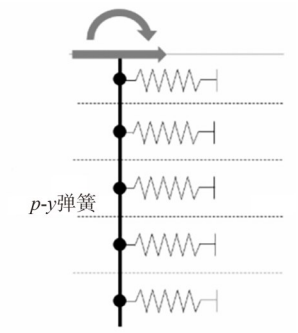
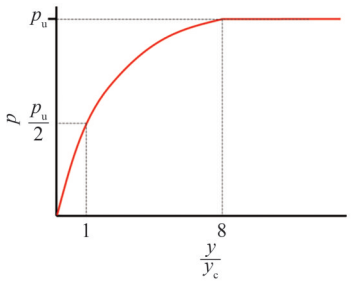


图1　水平荷载下桩基础的梁-弹簧p-y模型

Fig. 1　p-y model of pile foundation under horizontal loads



注：P_u为极限抗力；y_c为$2.5\varepsilon D$，其中ε为在实验室对未扰动土试样做不排水压缩试验时，其应力达到最大应力的一半的应变，D为桩基础直径。

图2　API规范推荐的归一化p-y弹簧曲线

Fig. 2　Normalized p-y spring curve recommended by API

3种经典p-y曲线已经被列入API规范，分别是Matlock[3]提出的软黏土的p-y曲线、Reese等[4]提出的硬黏土p-y曲线以及Mcvay等[5]提出的砂土p-y曲线。由于p-y曲线基于小直径长柔桩（D=0.324 m，L=12.8 m）试验得来，同时考虑了一定的保守系数。

但大直径单桩在水平荷载和旋转弯矩作用下，基础周围土体破坏模式与传统长桩有明显区别。挪威船级社在其海上风机基础设计规范（DNVGL-ST-0126）[6]中指出，传统p-y曲线仅适用于小直径柔性长桩，其直径不超过1 m。同时，循环加载效应下API方法推荐的修正公式并没有独立于循环加载的次数、性质以及循环荷载的大小，从土力学的角度来说是不合理的。

根据建成项目的大直径单桩基础监测数据，采用API规范的p-y曲线法设计的单桩基础计算整机频率与实测值约有10%~20%的误差。

2）有限元模拟标定法。

规范DNVGL-ST-0126[6]明确要求用于大直径单桩基础设计的土体抗力曲线需采用有限元模拟进行标定。通常可以在某个风场选定若干个代表性风机机位，同步开展有限元数值模拟和梁-弹簧

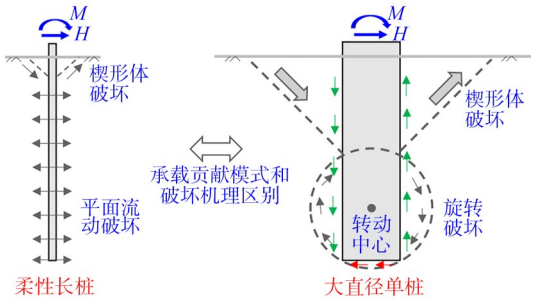
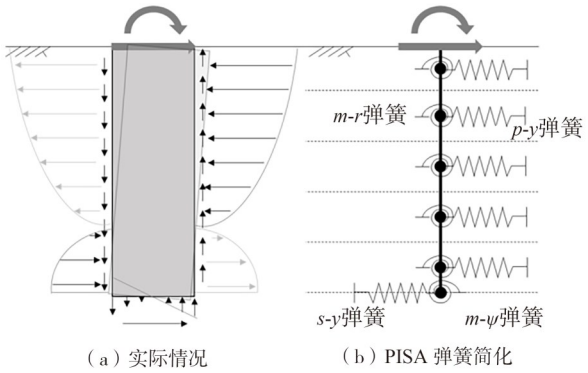


图 3　柔性长桩与大直径单桩周围土体破坏机理区别

Fig. 3　Differences in the failure mechanism of soil around flexible long piles and large-diameter monopiles



（a）实际情况　（b）PISA 弹簧简化

图 4　PISA 多弹簧模型

Fig. 4　PISA multi-spring model

分析，通过修正梁-弹簧模型中采用的土体抗力曲线，使梁-弹簧模型计算的桩基础响应与有限元计算结果一致。常用的模拟岩土工程问题的有限元软件包括 ABAQUS、ANSYS、plaxis3d 等，有限元模拟计算可以准确地得到单桩基础在不同工况下应力、变形等计算结果，但有限元模拟需要精确的岩土参数，且求解土体固结、蠕变效应的建模及接触面建立的过程复杂，难度大，调整校核模型需要花费大量的时间，计算成本高，不适用于风场中每一台风机基础的单独计算。

3）PISA 方法。

PISA 设计方法是近些年由碳信（Carbon Trust）管理，英国牛津大学、帝国理工等大学共同完成的工业联合项目（Joint Industry Project，JIP）的研究成果。该项目针对北海的冰川成因超固结黏土（不排水剪切强度高达几百千帕）与密实砂土分别开展了大尺寸现场模型桩试验及配套的有限元数值仿真模拟，提出了 PISA 大直径桩-土分析框架模型。与 API 方法相同，这也是一个 Winkler 模型，其与 API 方法的显著区别是除了沿深度分布的 p-y 弹簧以外，该模型还包括三种额外的弹簧：桩侧摩抗弯弹簧（m-r）、桩端抗力弹簧（s-y，m-ψ）（图 4）。

与 API 方法的 p-y 弹簧相比，PISA 方法的模型更符合大直径单桩真实的岩土承载贡献模式，但该方法总结的参数都是特定于 PISA 项目所选择的测试场地，不具备普适性，且砂土层中对刚度有显著影响的相对密度和平均有效应力都没有考虑在 PISA 方法提供的弹簧公式中。因此 PISA 方法具有很强的局限性，当场址的岩土条件出现差异，PISA 项目中总结的经验参数便不再适用。PISA 模型的所有参数都是基于数据拟合，并没有和土体本身的强度与应力-应变关系建立本质联系，PISA 模型的开发者也建议 PISA 模型仅能直接用于北海地区与测桩试验类似地质条件的场地的大直径单桩基础的概念设计。此外，PISA 方法只能考虑单调加载的情况，无法考虑循环荷载的影响。

4）NGI 土体应力-应变推导法。

考虑到上述 PISA 方法的局限性，挪威岩土所（NGI）提出了多弹簧分析模型。相比于 PISA 模型，该模型从根本上与土体自身的应力-应变特性联系起来，具有普适性。针对一个新的设计场地，只需根据设计场地土层实际测量到的应力-应变曲线，便可获得与之相应的土体抗力弹簧。目前该方法的应用主要局限在欧洲的北海海域，该海域土质主要为超固结黏土和致密砂土。由于中国广东海域土质主要为正常固结软黏土，与欧洲海域土质存在较大差距，因此欧洲北海海域的岩土信息无法直接应用在广东海域的单桩结构设计中。

本文借鉴欧洲已有的大直径单桩设计的相关经验，结合广东海域的地质及环境条件，提出海上风电大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型，该模型依据 NGI 提出的应力-应变推导法，引入单桩基础底部的抗力弹簧和单桩侧壁摩擦引起的弯矩抗力弹簧，建立土弹簧参数与岩土本构模型的关系。同时通过采用经精细化勘察及高级土工试验获取的针对广东沿海软弱土应力-应变本构模型，更加精准地模拟桩-土相互作用效应，实现海上风电大直径单桩基础的精细化设计。

2　改进型桩-土相互作用分析优化设计方法

大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型是一个 Winkler 梁-弹簧模型。该模型包含 3 种弹簧：沿

深度分布的水平向p-y弹簧、桩端抗力s-y弹簧以及桩侧摩抗弯m-θ弹簧。该模型依据岩土本构模型，从根本上与土体自身的应力-应变特性联系起来。该方法技术路线见图5。

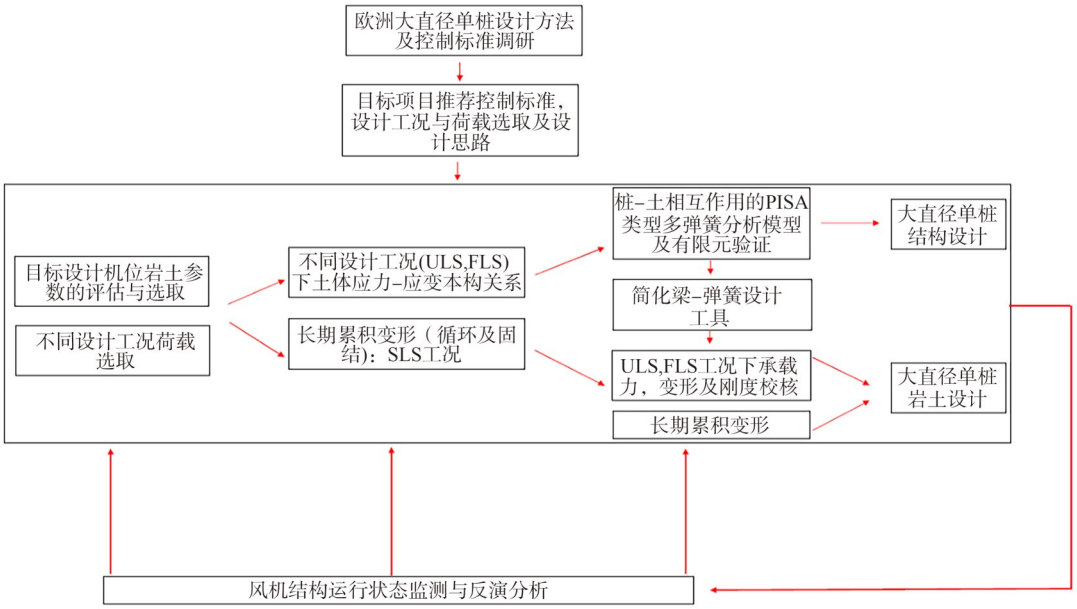


图5 大直径单桩基础改进型桩-土相互作用分析优化设计方法技术路线

Fig. 5 Technical methodology for the improved pile-soil interaction analysis and optimized design of large-diameter monopile foundations

1）p-y弹簧。

本模型的p-y弹簧基于Zhang和Andersen[7]在2017年提出的理论框架。该框架通过单剪试验得到土体的应力-应变曲线，根据应变结果通过等效转换得到归一化的横向位移值，进而得到p-y曲线（图6）。式(1)表达了p-y曲线与应力-应变曲线之间的数学关系。

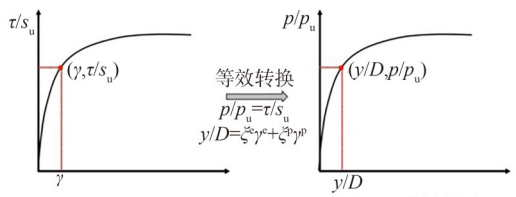
$$\frac{p}{p_u}=\frac{\tau}{s_u} \tag{1a}$$

$$\frac{y}{D}=\xi^e\gamma^e+\xi^p\gamma^p \tag{1b}$$

式中：p为侧向土反力；p_u为极限水平土抗力标准值；τ为单剪试验中的剪应力；s_u为土体不排水抗剪强度；y为侧向位移；D为桩基础直径；ξ^e和ξ^p分别为土体的弹性剪应变和塑性剪应变；γ^e和γ^p分别为土体的弹性比例系数和塑性比例系数。

2）s-y弹簧。

Zhang和Andersen[8]在2019年研究了桩端阻力对整体单桩响应的贡献，认为在考虑桩端阻力时只需要考虑剪切分量（图7），并基于这种简化建立了剪力(s)-水平相对位移(y)与土体应力-应变曲线的比例关系。式(2)表达了剪力(s)与剪应力(τ)之间的数学关系，位移与应变的数学关系参考式(1b)。



（a）土体应力-应变关系　　（b）p-y弹簧关系

注：γ为剪应变。

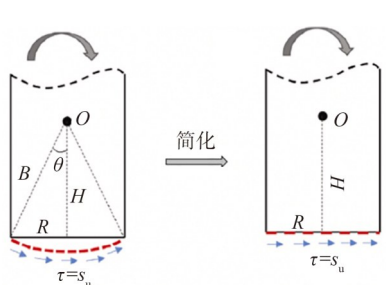
图6 从土体应力-应变关系缩放获取p-y弹簧方法示意

Fig. 6 Schematic diagram of the method for deriving p-y springs from soil stress-strain relationships

$$\frac{s}{s_{ult}}=\frac{\tau}{s_u} \tag{2}$$

式中：s_{ult}为最大桩端剪力。

3）m-θ弹簧。



（a）桩端旋转受力机制　　（b）简化后桩端受力机制

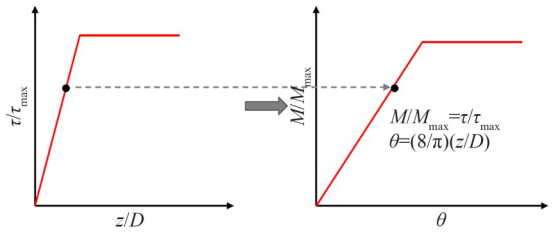
图7 桩端阻力剪切分量简化示意

Fig. 7 Simplified diagram of the shear component of pile end resistance

Fu 等[9]在 2020 年推导了极限抗弯阻力的表达式，然后建立了力矩-转角（$m-\theta$）弹簧与轴向侧摩阻-竖向位移（$t-z$）弹簧的关系式，并基于 $t-z$ 弹簧与应力-应变曲线的关系建立了 $m-\theta$ 弹簧与土体应力-应变曲线的关系（图 8）。式（3）表达了 $t-z$ 弹簧与 $m-\theta$ 弹簧之间的比例关系，式（4）表达了 $t-z$ 曲线与应力-应变曲线之间的数学关系：

$$\theta = \frac{8}{\pi}\frac{z}{D} \tag{3}$$

$$\frac{z}{D} = \xi^{e}\gamma^{e} + \xi^{p}\gamma^{p} \tag{4}$$



（a）$t-z$ 弹簧的归一化关系　　（b）$m-\theta$ 弹簧的归一化关系

注：τ 为剪应力；τ_{max} 为极限剪应力；M 为抗弯弯矩；M_{max} 为侧阻贡献的极限抗弯弯矩。

图 8　$t-z$ 弹簧与 $m-\theta$ 弹簧之间的比例关系

Fig. 8　Scaling relationship between $t-z$ spring and $m-\theta$ spring

3　广东某风场应用情况

本文大直径单桩设计方法已应用于广东某海上风电项目的大直径单桩基础的结构设计中，并与传统的 API 方法进行对比，具体分析及结果如下：

3.1　改进型桩-土相互作用模型

3.1.1　荷载计算

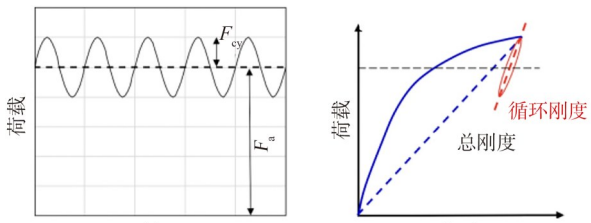
桩-土相互作用计算前，通过 SACS 软件将风机、风荷载、波浪荷载和流荷载等效到泥面位置再进行下一步的计算。不同的计算工况对应不同的重现期荷载：

1）50 年一遇的等效台风工况荷载，用于承载能力极限状态（ULS）工况计算；

2）10 年一遇、5 年一遇的等效台风工况荷载，用于正常使用极限状态（SLS）工况计算；

3）对应多年平均风速的正常发电工况荷载，用于疲劳极限状态（FLS）工况计算。

其中 ULS 和 SLS 的计算直接使用泥面荷载的计算值对泥面以下桩基础的 UC（Unity Check，应用系数）值和位移进行求解，在 FLS 的计算中，更关注基础的循环刚度而不是总刚度，因此需要得到泥面处单桩基础的循环荷载。



（a）循环荷载示意　　（b）荷载-位移关系

注：F_{cy} 表示循环荷载幅值；F_a 表示循环荷载平均值。

图 9　刚度与循环荷载的关系

Fig. 9　Stiffness versus cyclic loads

根据附近风场的项目实测经验，循环荷载与平均荷载的比值约为 1∶3，因此循环荷载的分量取计算值的 25% 进行 FLS 的计算。

3.1.2　岩土工程设计

该部分的设计根据项目对应风机机位的实际岩土参数，结合该海上风电场址原位 CPTU 试验以及高级土工试验的结果，确定不同深度土层的相关参数。

图 10 及图 11 显示了修正后的锥端阻力（q_c）和孔隙水压力 u_2 随深度的关系。可以看到：海床深度约 20 m 以下为强度极低的黏土层，中间夹着粉质混淤泥或砂质与泥土；海床深度 20~50 m 之间为中高强度的粉质黏土，中间夹着松散粉砂层和中密粉砂层；海床 50 m 以下从中密逐渐向密实砂土过渡。

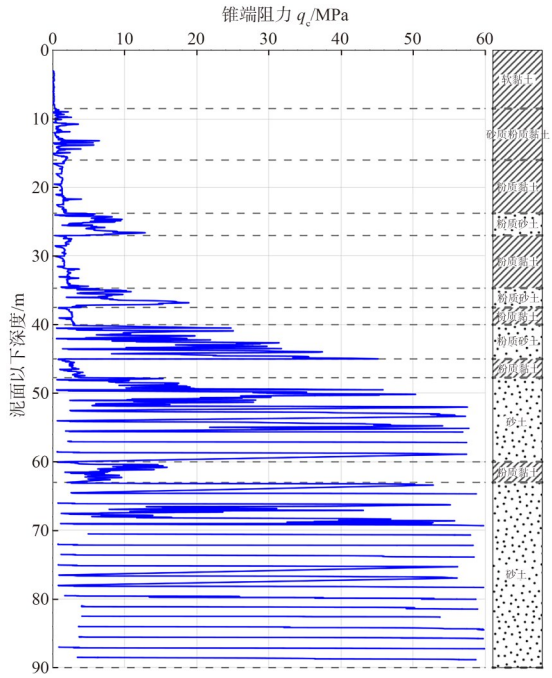


图 10　锥端阻力（q_c）随深度的关系

Fig. 10　Measured cone resistance（q_c）versus depth

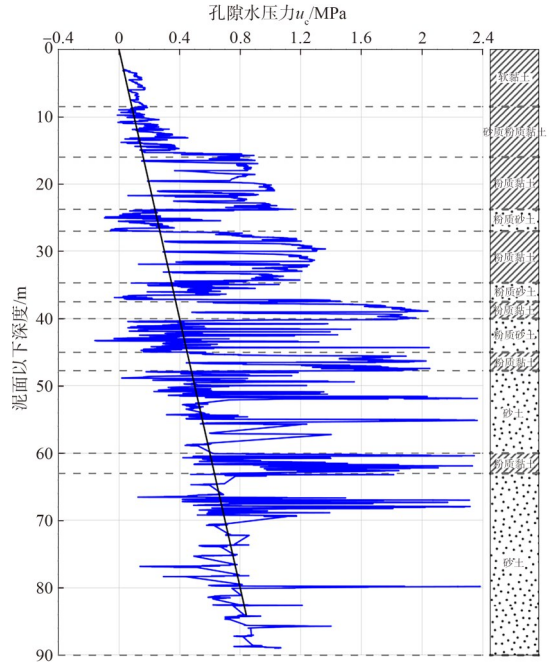


图 11 孔隙水压力(u_2)随深度的关系

Fig. 11 Measured pore pressure (u_2) versus depth

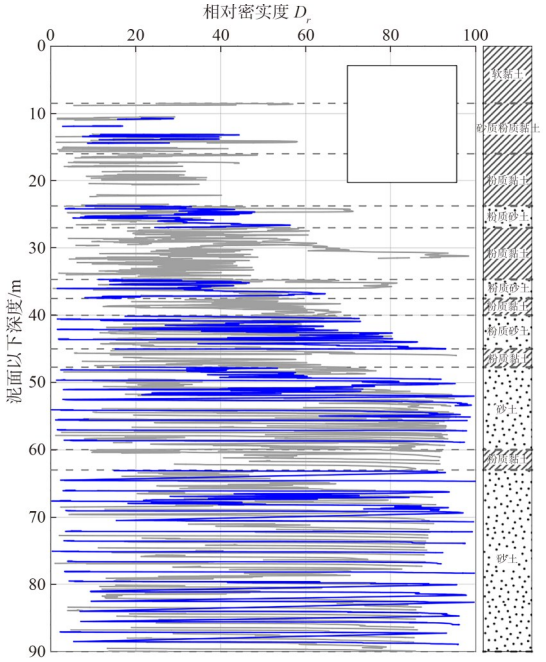


图 13 相对密实度随深度的关系

Fig. 13 Relative density D_r versus depth

图 12及图 13显示了根据CPTU结果解读的不排水抗剪强度S_{uC}以及相对密实度D_r。其中不排水抗剪强度曲线对应于三轴抗压强度。可见：海床表层的粉质黏土及中层中高强度的粉质黏土的不排水抗剪强度均随深度线性增加；海床表层 50 m的砂土层相对密实度较低，预期含较多粉粒、黏粒，循环强度低；海床50 m以下的密实砂土相对密实度很高。

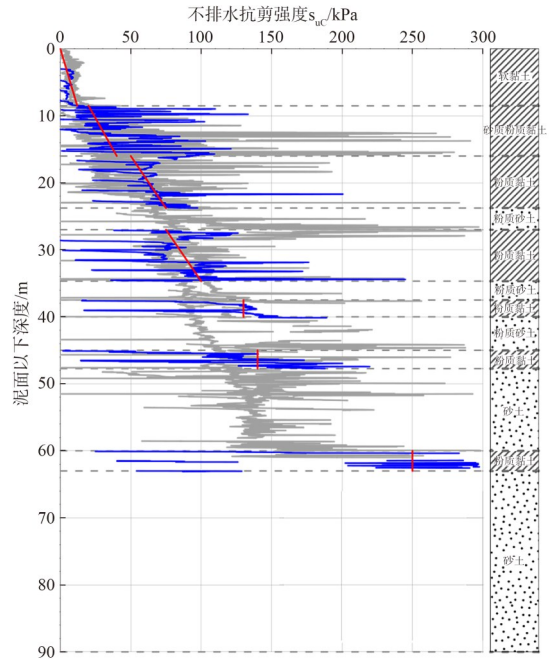


图 12 不排水抗剪强度(s_{uC})随深度的关系

Fig. 12 Undrained shear strength versus depth

图 14~16分别显示了通过本研究方法计算后各层土底部对应标高的p-y弹簧曲线、m-θ弹簧曲线以及桩底s-y弹簧曲线。图中，11~55 m分别对应各土层的底部深度。

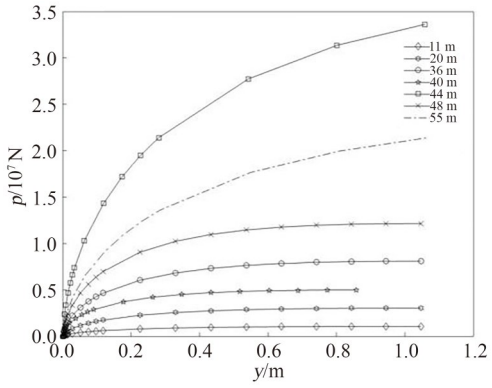


图 14 各土层底部p-y弹簧曲线

Fig. 14 p-y spring curves at the bottom of each soil layer

3.2 与传统API方法差异

本文方法已应用在广东某海域的单桩基础设计中，该基础所在机位水深32.27 m，桩径10.6 m，基础质量2285 t，桩长104.27 m。与传统API方法相比，本文方法对ULS、SLS以及FLS工况均有不同程度的优化。

1）ULS工况。

如图 17所示，在ULS工况对泥面以下桩进行结构强度计算，使用传统API p-y弹簧法，泥面以下的桩身最大应力为 170 MPa，使用本文提出模型的桩

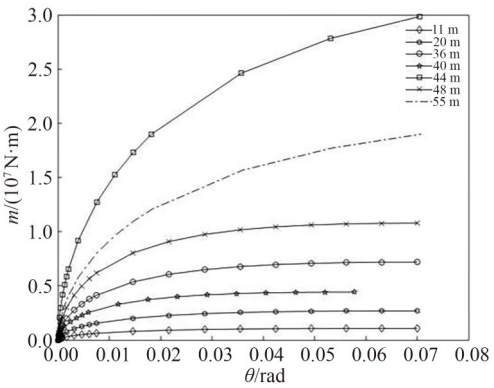


图 15　各土层底部 $m-\theta$ 弹簧曲线

Fig. 15　$m-\theta$ spring curves at the bottom of each soil layer

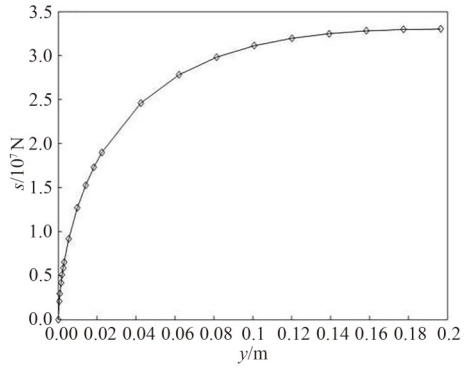


图 16　桩底 $s-y$ 弹簧曲线

Fig. 16　$s-y$ spring curve at pile tip

身最大应力为 118 MPa。计算结果对比见表 1。

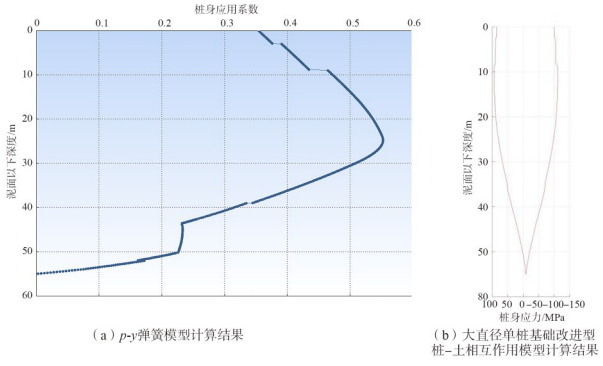


图 17　ULS 工况下桩身应力计算结果

Fig. 17　Stress results under ULS conditions

表 1　ULS 工况下 $p-y$ 弹簧模型与大直径单桩基础改进型桩–土相互作用模型结果对比

Table 1　Comparisonof results between the $p-y$ spring model and the enhanced pile–soil interaction model for offshore wind power large–diameter monopile foundations under ULS conditions　MPa

计算模型	桩身最大应力
传统 API PY 弹簧	170
大直径单桩基础改进型桩–土相互作用模型	118

表 2　SLS 工况下 $p-y$ 弹簧模型与大直径单桩基础改进型桩–土相互作用模型结果对比

Table 2　Comparison of results between the $p-y$ spring model and the enhanced pile–soil interaction model for offshore wind power large–diameter monopile foundations under SLS conditions

计算模型	最大竖向位移/cm	泥面水平位移/cm	最大转角/(°)
传统 API PY 弹簧	0.368	8.49	0.201
大直径单桩基础改进型桩–土相互作用模型	0.372	5.21	0.142

2)SLS 工况。

在 SLS 工况对泥面以下桩进行位移计算，使用传统 API $p-y$ 弹簧模型与本文提出的模型分别对桩身竖向位移、桩身水平位移以及桩身转角进行计算。结果分别如图 18~20 所示。计算结果对比见表 2。可见：使用传统 API $p-y$ 弹簧模型计算得到的最大竖向位移为 0.368 cm，泥面水平位移为 8.49 cm，桩身最大转角为 0.201°；本文提出的模型计算得到的最大竖向位移为 0.372 cm，泥面水平位移为 5.21 cm，桩身最大转角为 0.142°，明显小于使用传统 API $p-y$ 弹簧模型计算得到的位移值。

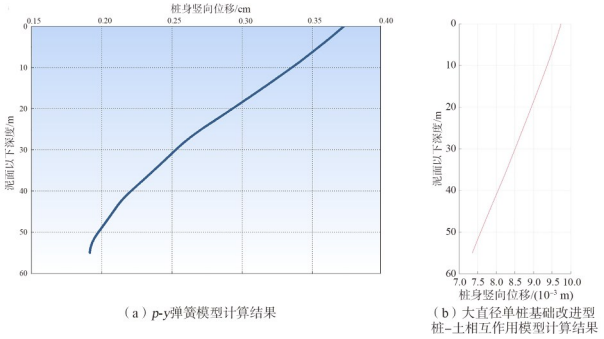


图 18　SLS 工况下桩身竖向位移计算结果

Fig. 18　Axial deflection results under SLS conditions

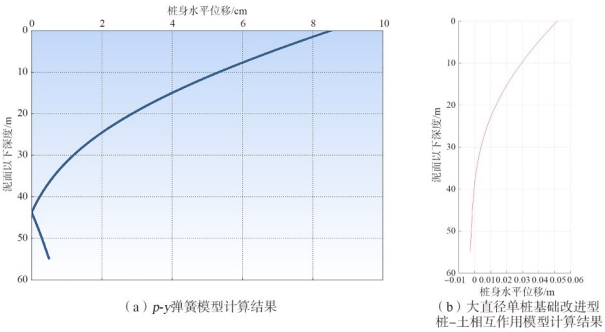
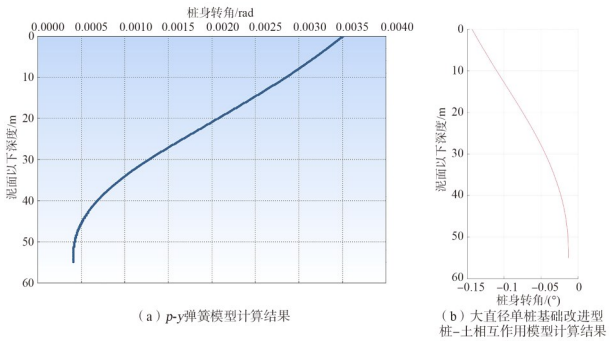


图 19　SLS 工况下桩身水平位移计算结果

Fig. 19　Lateral displacement results under SLS conditions

3)FLS 工况。

如图 21 所示，在 FLS 工况下对单桩基础整机频率进行计算，使用传统 API $p-y$ 模型计算得到的 1~3

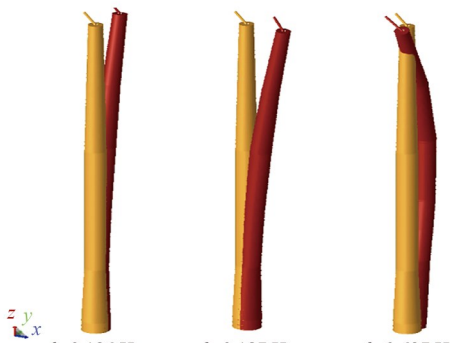


（a）*p-y*弹簧模型计算结果　（b）大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型计算结果

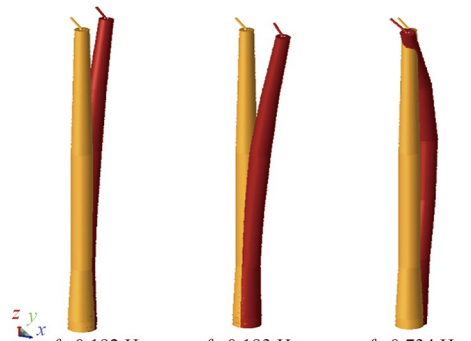
图 20　SLS 工况下桩身转角计算结果

Fig. 20　Rotation results under SLS conditions

阶整机频率分别为0.186，0.187，0.637 Hz；使用本文方法计算得到的1~3阶整机频率分别为0.192，0.193，0.734 Hz，较传统API方法有明显提升。计算结果对比见表3。



（a）*p-y*弹簧模型下1~3阶整机频率



（b）大直径单桩基础改进型桩-土互相作用模型下1~3阶整机频率

图 21　FLS 工况下 *p-y* 弹簧模型

Fig. 21　Frequency results calculated by using the *p-y* spring model

通过ULS、SLS以及FLS工况下传统API *p-y*弹簧模型及本文提出的改进型桩-土相互作用模型的对比可知：，本文提出的方法可以显著提高大直径单桩桩-土相互作用的刚度和承载力。

表 3　FLS 工况下 *p-y* 弹簧模型与大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型计算整机频率结果对比

Table 3　Comparison of frequency results between the *p-y* spring model and using the enhanced pile-soil interaction model for offshore wind power large-diameter monopile foundations under FLS conditions　Hz

计算模型	一阶	二阶	三阶
传统API *p-y* 弹簧	0.186	0.187	0.637
大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型	0.192	0.193	0.734

4　结　论

通过研究大直径单桩基础周围土体破坏机理，建立了一套海上风电大直径单桩基础改进型桩-土相互作用模型。该模型除了传统沿深度分布的水平向 *p-y* 弹簧外，通过引入桩端抗力 *s-y* 弹簧以及桩侧摩抗弯 *m-θ* 弹簧，可以显著提高桩-土相互作用的刚度及承载力，解决了目前国内单桩基础设计过于保守导致成本过高及施工困难的问题，为后续大直径单桩基础的设计提供参考。

针对大直径单桩技术的后续研究，建议：开展大直径单桩基础在国内不同海域场址条件下的适应性研究，建立海上风电精细化地勘技术体系，建立不同海域典型土体的岩土本构模型，开展总体设计及适用性研究。

参　考　文　献

[1] 国家能源局. 海上风电场工程风电机组基础设计规范：NB/T 10105-2018 [S]. 北京：中国水利水电出版社，2018.

[2] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API RP 2A-WSD [S]. 21st Edition. Rockville: American Petroleum Institute, 2000.

[3] MATLOCK H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay [C]//American Society of Civil Engineers. Offshore Technology Conference. Houston, Texas: 1970.

[4] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay [C]//American Society of Civil Engineers. Offshore Technology Conference. Houston, Texas: 1975.

[5] MCVAY M C, NIRAULA L. Development of *p-y* curves for large diameter piles/drilled shafts in limestone for fb-pier [R]. Gainesville: University of Florid, 2004.

[6] Det Norske Veritas. Support structures for wind turbines. DNVGL standard: DNVGL-ST-0126 [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2018.

[7] ZHANG Y, ANDERSEN K H. Scaling of lateral pile p-y response in clay from laboratory stress-strain curves [J]. Marine Structures, 2017, 53: 124-135.

[8] ZHANG Y, ANDERSEN K H. Soil reaction curves for monopiles in clay [J]. Marine Structures, 2019, 65: 94-113.

[9] FU D, ZHANG Y, AAMODT K K. A multi-spring model for monopile analysis in soft clays [J]. Marine Structures, 2010, 72: 102768.