

# 高压旋喷桩在海上风电桩周土加固中的应用

郭琼玲

(福建省岩土与环境企业工程技术研究中心/福建永强岩土股份有限公司, 福建 龙岩 364000)

**摘要:** 目前海上风电桩基础在海洋动力环境作用下出现过度水平位移的现象, 通常采用增加桩径的方法来提高桩基水平承载力, 造成钢管桩制作成本增加, 施工难度大大提高, 制约海上风电发展。本文结合海上风电工程实例, 开展海洋地基加固技术对海上风电桩基础水平承载力影响的研究, 探讨高压旋喷桩加固技术在海洋环境下的加固深度、工艺参数、加固效果等。通过加固后现场取芯及有限元实体模型验算结果表明, 采用高压旋喷桩加固技术可有效强化风机桩周土层的刚度, 达到提高桩基水平承载力、减小桩基础水平位移和降低工程成本的目的。可为海上风电工程防灾减灾提供技术支撑, 具有重要的社会效益和推广价值。

**关键字:** 海上风电; 水平荷载; 土抗力; 高压旋喷桩; 有限元分析

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0062-05

## Application of the high pressure jet grouting pile in soil reinforcement around offshore wind power pile

GUO Qiong-ling

(Geotechnical and Environmental Enterprise Engineering Technology Research Center of Fujian Province/  
Fujian Yongqing Geotechnical Co., Ltd., Longyan 364000, Fujian, China)

**Abstract:** In view of the phenomenon of excessive horizontal displacement of offshore wind power pile foundation in dynamic marine environment, the method of increasing pile diameter is usually used to improve the horizontal bearing capacity of pile foundation. However, this method will increase the cost of steel pipe piles and increase the difficulty of construction, which will ultimately restrict the development of offshore wind power. Based on the example of offshore wind power project, this paper studies the influence of offshore foundation reinforcement technology on the horizontal bearing capacity of offshore wind power pile foundation. In addition, the reinforcement depth, process parameters, and reinforcement effects of the high pressure jet grouting pile reinforcement technology in the marine environment are discussed. The results of in-site coring and finite element model analysis show that the high pressure jet grouting pile reinforcement technology can effectively strengthen the soil layer around the wind power pile. The purpose of increasing the horizontal bearing capacity of the pile foundation, reducing the horizontal displacement of the pile foundation and reducing the engineering cost is achieved. It can provide technical support for disaster prevention and mitigation of offshore wind power projects, and has important social benefits and promotion and application value.

**Key words:** offshore wind power; horizontal load; soil resistance; high pressure jet grouting pile; finite element analysis

## 0 引言

风能作为一种可持续发展的清洁能源, 具有巨大的发展潜力<sup>[1]</sup>。海上风力发电相对于陆上风能, 优势突出, 发展迅速。海上风电基础类型较多, 单桩基础因结构简单、安装方便, 成为主要的基础型式<sup>[2]</sup>。在复杂海洋环境下, 单桩基础受到风、浪、

流等水平荷载的作用, 产生较大的水平承载力和水平位移, 威胁上部风机的安全, 一旦水平位移超过设计值, 会影响风机后续施工、降低整体稳定性、危及风机运营的安全<sup>[3-6]</sup>。目前为提高桩基础刚度和水平抗力常采用加大桩基础直径的手段。但由于大直径钢管桩制作成本高, 加之对施工工艺、施工设备要求高, 制约了海上风电行业的发展。因此, 如

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 福建省科技计划项目(2021H4024); 福建省科技计划项目(2020I1011)。

作者简介: 郭琼玲(1991—), 女, 福建龙岩人, 本科, 助理工程师, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: yqytgql@163.com。

何有效提高单桩基础水平承载特性、降低工程成本是亟待解决的问题。

桩基的水平承载力是由桩基础刚度及桩侧的土抗力（尤其是上部浅层土体）控制<sup>[7-8]</sup>，浅层土层主要为淤泥、粉砂土，土质相对较差。故可采用地基加固技术改变桩周土特性，从而有效提高桩基水平承载力，减小桩基水平位移，降低施工成本<sup>[9-10]</sup>。高压旋喷桩因占地面积小、工艺简单、成本低廉等特点，是应用较为广泛的一种地基处理手段，但目前主要用于陆上工程，在海上的应用鲜有报道。

本文依托某海上风电场项目，详细阐述了高压旋喷桩技术在加固海上风电桩周土中的设计方案和关键施工要点，为海上进行桩周土加固项目提供借鉴和参考，也进一步推广高压旋喷桩加固技术在海洋工程地基处理中的应用。

### 1 工程简介

#### 1.1 工程概况

广东沿海某海上风电场项目，总装机容量为 500 MW，海域水深在 23~28 m 之间，场址中心离岸距离约 15 km，共布置 91 台风电机组，风机基础形式为大直径单桩基础（单桩直径 7.5 m），设计级别为 1 级。目前已完成部分机位桩基础沉桩。

#### 1.2 地质条件

根据已沉桩 X 机位地勘资料揭示，在钻进深度控制范围内，地层主要有淤泥（层厚 1 m）、淤泥质土（层厚 1.5 m）、粉砂混淤泥（层厚 2.5 m）、粉砂混黏性土（层厚 4.2 m）、粉砂（层厚 3.3 m）、淤泥质土（层厚 2.5 m）、粉质黏土（层厚 8.6 m）、中砂、砾砂、粉质黏土等。

#### 1.3 问题及分析

X 号机位单桩验收时法兰面倾斜度为 0.7‰，半年后在准备安装塔筒时复测 X 号机位的法兰倾斜度达 13.06‰，与验收时信息对比有较大变化且超过设计要求（3‰）。通过对设计、地勘等进行复核，结论表明出现该现象是由于单桩基础沉桩后，上部浅层桩周土因承载力低、稳定性差，不足以抵抗风、浪、流等水平荷载作用，而产生较大水平位移。

### 2 加固方案

考虑到现有桩基础的倾斜情况以及后续可能出现的变形对结构整体稳定性的影响，从施工角度

和经济性方面综合考虑，采取桩周土加固方案。加固处理的目的是强化桩周土层，改善桩周土体特性，提高桩基础的整体刚度和抗水平承载能力，控制基础变形及泥面转角，保障桩基础的稳定性及安全性。因加固施工需在海上进行，操作平台有限，受环境影响大，故本工程选定高压旋喷桩地基处理技术加固桩周土层。具体如下：在钢管桩周围（桩外一倍桩径）内采用多圈高压旋喷桩加固土层，加固主要针对上部软土地层（淤泥、淤泥质土、粉砂混淤泥及粉砂混黏性土）和易松动塌陷的砂层，加固深度为海床面以下约 16 m，桩端落在粉质黏土层上（如图 1、图 2 所示）。参考相关经验，加固后的地层取芯芯样室内抗压强度值设计要求达 1.6 MPa，土体置换率按 27% 考虑。

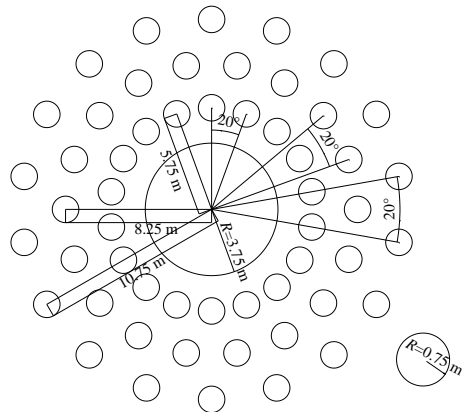


图 1 旋喷加固平面示意图

Fig. 1 Arrangement of jet grouting pile

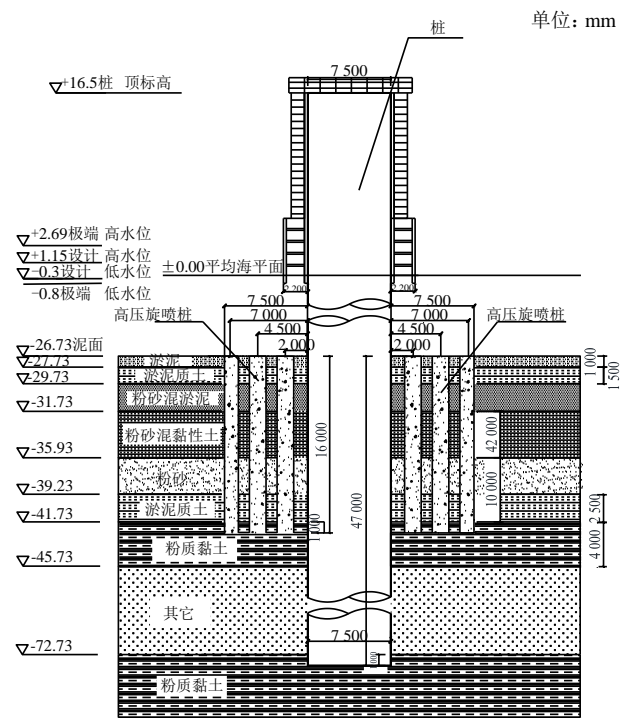


图 2 加固效果剖面示意图

Fig. 2 Cross section of the reinforcement

### 3 施工工艺

本工程高压旋喷桩施工采用三管法施工。主要施工流程为：施工船就位-处理前钻探取芯探摸-桩外侧最外圈先进行引孔、三管法高压旋喷注浆试桩-桩外侧一定范围按从里到外顺序重复依次进行引孔、三管法高压旋喷注浆，累计完成54根旋喷桩-对桩周土抽芯自检（见图3）。

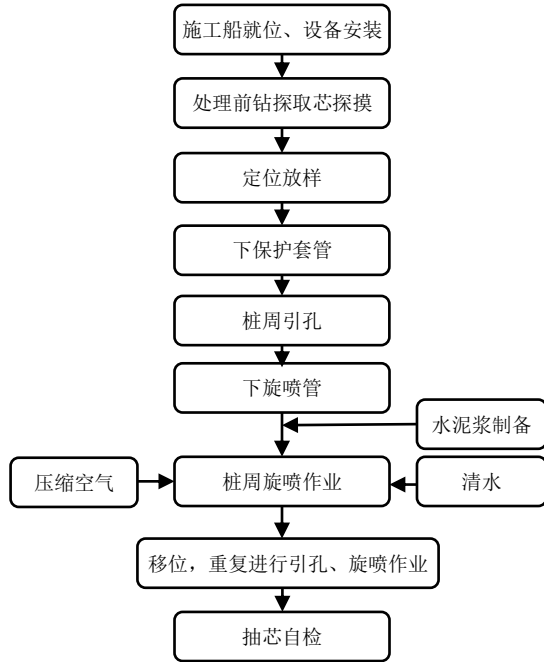


图3 施工工艺流程图

Fig. 3 Construction flow chart

#### 3.1 布孔、定位

施工前绘制旋喷孔布置图。桩外共布置3圈旋喷桩（旋喷孔中心距桩基础外壁分别为2 m、4.5 m、7 m），每圈以20°环形阵列布置18个旋喷孔，共54个，并统一编号。使用四锚定位平板海上施工驳船，按设计要求采用测量仪在施工船的作业平台上测设放线定出钻孔位置。并就近搭建7 m×8 m施工平台，安装300型钻机和旋喷钻机，旋喷机机头对准井口位置，300型钻机提供提引的动力源，但因为平台空间位置不足不能将钻机放在旋喷机正后方，所以将钻机放在旋喷钻机旁边，在旋喷钻机后挂一个滑轮组，将提引绳引到滑轮组后接入旋喷机头（见图4）。钻孔前应调试空压机、泥浆泵、搅拌机，使设备运转正常。施工顺序从里圈到外圈。

因桩基础有附属构件，挑出桩外壁约2.2 m，为避免施工时碰到损坏附属构件及防腐涂料，最内圈且靠近附属构件的两根旋喷桩的定位按设计方案往桩外移70 cm，保证旋喷桩桩中心距离桩外壁

2.7 m（见图5）。

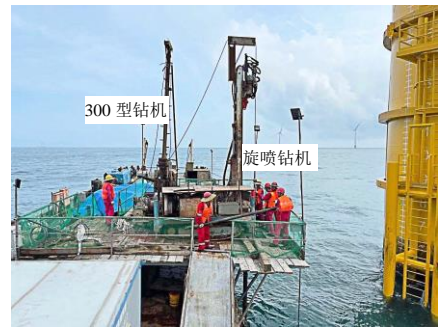


图4 设备安放现场图

Fig. 4 Layout of the equipment

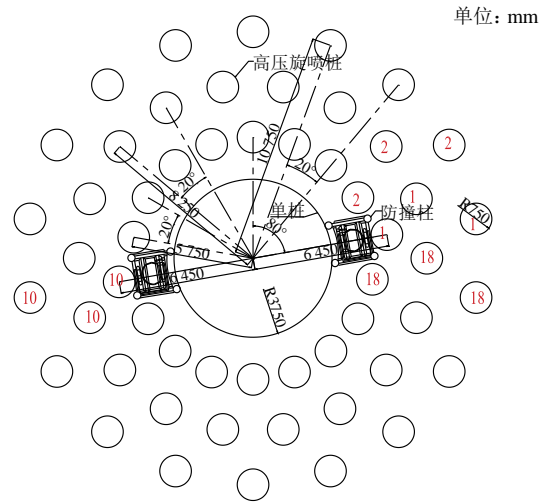


图5 定位布孔平面示意图

Fig. 5 Layout of the pile position

#### 3.2 试桩确定施工参数

高压旋喷桩针对不同地基需要不同的工艺参数才能保证桩体加固质量。正式加固前，在桩外侧一倍桩径处（最外圈）先引孔进行三管法高压旋喷注浆试桩，确定主要参数如下：

(1) 每个孔都需复喷一次；

(2) 水泥浆水灰比1:1，流量80~150 L/min，采用P.O.42.5水泥，添加适量氯化钙早强剂（掺量控制在0.5%~1%）、水玻璃速凝剂（掺量控制在22%~28%）；

(3) 旋喷浆压力：第一次取 $\geq 30$  MPa，复喷取 $\geq 25$  MPa；

(4) 气压0.6~0.8 MPa，进气量1.2~1.8 m<sup>3</sup>/min；

(5) 水压30~50 MPa，流量80~100 L/min；

(6) 旋喷速度10~20 r/min，喷管提升速度：第一次控制在15 cm/min，复喷提升速度控制在20 cm/min。

#### 3.3 桩周旋喷作业

下好套管后立即进行旋喷作业，旋喷顺序跟引

孔顺序一样，均为从里圈到外圈。根据试桩确定的施工技术参数调试好设备，插入端部自带钻头的三重旋喷管，在旋喷钻机的动力作用下，旋喷管边往下钻孔边进行高压喷射注浆作业，水泥浆、空气和水同时喷射，钻喷到设计深度后开始启管，边启管边进行复喷。控制第一次喷射和复喷的流量和旋进速度并记录。

## 4 效果检验

### 4.1 钻孔取芯结果

高压旋喷桩加固施工完成后 28 天，采用 XY-100 型钻机进行随机钻孔取芯，芯样长度不小于 16 m，检测的旋喷桩数量不少于总桩数的 1%，且不少于 3 根，每圈旋喷桩至少取 1 根，每根旋喷桩取 1 个检测孔，孔位置在桩中心附近。

本次钻孔取芯监测共 6 个孔，每圈取 2 个孔，每个孔取部分芯样做室内抗压强度试验（见图 6）。检测结果表明：加固处理后的芯样基本成柱状，灰色坚硬，完整性较好。室内抗压强度分别为 4.53 MPa、5.26 MPa、4.35 MPa、4.77 MPa、6.02 MPa、5.43 MPa，均达到设计加固方案要求值，加固效果达到预期目标。



图6 钻孔取芯样  
Fig. 6 Core sampling

### 4.2 桩基加固有限元实体模型验算

为进一步分析本项目加固方案的效果及加固

机理，项目组开展桩基加固有限元计算分析。

(1) 作业工况：按照 50 年一遇的台风极限工况确定水平荷载：16 400 kN，沿 X 轴正向；弯矩荷载（水平荷载引起）：553 271 kN·m，关于 Y 轴顺时针；荷载作用位置按冲刷 4.5 m 后的泥面考虑。因竖向荷载对桩基水平变形可忽略，在有限元模拟中并未考虑。

(2) 土层模型：桩周土层采用 NGI-ADP 模型，每层土取均值，各向同性。通过 CPTU 勘察数据及 plaxis 材料模型手册确定模型刚度参数与强度参数，输入 plaxis 系统中计算分析。

(3) 高压旋喷桩模型：旋喷桩排水类型选定为不排水 C (Undrained C)，遵循 Tresca 屈服准则，不排水抗剪强度参数  $S_u=500$  kPa，杨氏模量  $E=200$  MPa，泊松比 0.495。大直径单桩与土接触面设置为完全粗糙，旋喷桩与周围土不必设置接触面，有限元分析实体模型见图 7。

a) 采用旋喷桩加固技术，水平位移从 0.038 m 降至 0.03 m，泥面转角由 0.12° 降至 0.095°。表明采用该加固方案，桩基刚度得到提升（见图 8）；

b) 通过图 9 的有限元计算结果云图表明，旋喷桩与原土体产生共同作用，使桩周土位移得到一定控制，提高地基承载力。

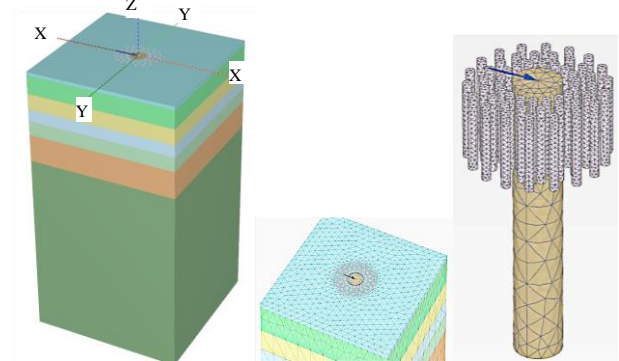


图7 有限元分析实体模型  
Fig. 7 Finite element analysis model

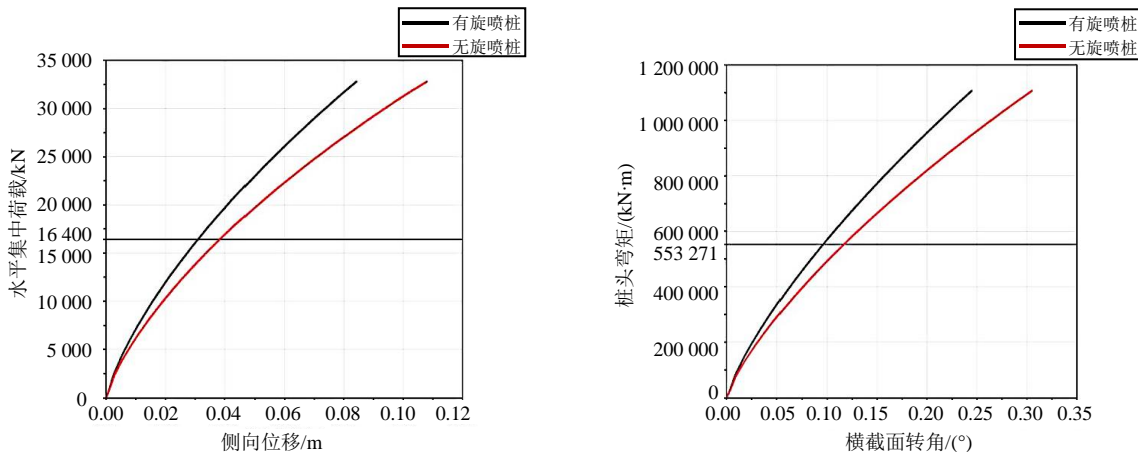


图8 桩基加固有限元计算结果  
Fig. 8 Finite element results of the reinforcement



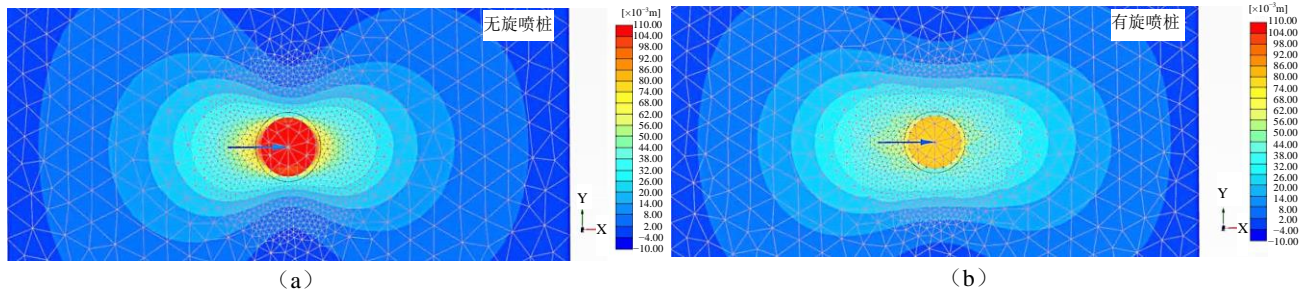


图9 桩周土有限元计算结果云图

Fig. 9 Nephogram of finite element results of soil around pile

## 5 结论

海上风机结构是高耸结构, 桩基础水平位移超过设计值会影响风机结构的整体稳定性。因海上施工环境与陆地差别较大, 针对海上风电桩周土加固技术的研究和应用很少。本文结合项目实际情况采用高压旋喷桩加固技术, 并通过钻孔取芯检测及有限元实体模型分析验算, 证实该加固方法效果好, 能够显著改善地基土的物理力学特性, 提高钢管桩刚度和水平承载力, 减小钢管桩水平变形, 同时降低海上风电工程成本, 确保风机结构整体稳定性。可为其他类似海上风电工程提供一定的经验参考和借鉴。

### 参考文献

- [1] 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[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 132-134.  
HUANG Wei-ping, LIU Jian-jun, ZHAO Zhan-hua. The state of the art of study on offshore wind turbine structures and its development[J]. Ocean Engineering, 2009, 27(2): 132-134.
- [2] 贺晓泉, 安磊, 吴华平. 浅谈海上风电基础结构的现状及发展趋势[J]. 科技致富向导, 2012(18): 374-375.  
HE Xiao-quan, AN Lei, WU Hua-ping. Present situation and development trend of offshore wind power infrastructure[J]. The Tech Get Rich Guide, 2012(18): 374-375.
- [3] 张光建. 长期水平循环荷载下大直径桩的累积位移分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
ZHANG Guang-jian. Analysis on horizontal displacement of monopile foundations under long-term cyclic lateral loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] 马明泊. 循环荷载下海上风电单桩基础水平承载力性能退化研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2015.  
MA Ming-bo. Research on degradation of lateral bearing

capacity for offshore wind turbine monopile under cyclic loading[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2015.

- [5] RAJASHREE S S, SUNDARAVADIVELU R. De-gradation model for one-way cyclic lateral load on piles in soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 19(4): 289-300.
- [6] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 软黏土中水平循环荷载作用下刚性短桩的  $p-y$  曲线分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 78-82.  
ZHANG Chen-rong, YU Jian, HUANG Mao-song.  $p-y$  curve analyses of rigid short piles subjected to lateral cyclic load in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 78-82.
- [7] 黄茂松, 吴志明, 任青. 层状地基中群桩的水平振动特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 34-38.  
HUANG Mao-song, WU Zhi-ming, REN Qing. Lateral vibration of pile groups in layered soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 34-38.
- [8] 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[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1807-1815.  
ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jin-chao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1807-1815.
- [9] 杨兵, 周军. 沿海滩涂风电工程软土地基施工质量的控制[J]. 安徽建筑, 2011(2): 103-105, 153.  
YANG Bing, ZHOU Jun. Quality control of soft subgrade construction on wind power project of coastal beach[J]. Anhui Architecture, 2011(2): 103-105, 153.
- [10] 冯是明, 邹福华. 水利工程施工中软土地基处理技术[J]. 水科学与工程, 2013(2): 78-80.  
FENG Shi-ming, ZOU Fu-hua. Study on soft soil foundation treatment technology in water conservancy construction[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2013(2): 78-80.