



東南大學  
SOUTHEAST UNIVERSITY

## 研究生讲座报告

B-SDM: 模拟单桩循环加载变形的刚度折减边界面本构模型

课程名称: 专业讲座

姓名: 桑阳

学院: 苏州联合研究生院

专业: 岩土工程

学号: 224642

课程老师: 赵学亮

2022 年 10 月 9 日

# 東南大學講座報告

SOUTHEAST UNIVERSITY

专业： 岩土工程  
姓名： 桑阳  
学号： 224642

讲座名称： B-SDM:模拟单桩循环加载变形的刚度折减界面本构模型

演讲人： 高智伟 讲座日期： 2022 年 10 月 9 日 讲座地点： 线上

## 一、 研究目的和背景

海洋风电对世界实现碳中和极其重要。现有的海洋风机主要采用单桩基础，波浪和海风的长期循环加载会导致单桩的累积侧向变形，对这一变形的准确预测是单桩设计的最关键部分之一。该报告将介绍一种实用的单桩侧向变形计算方法——界面刚度折减模型（B-SDM），该方法由格拉斯哥大学和 Geowynd（一个英国海洋风电咨询公司）共同开发，可以合理模拟单桩在循环加载条件下的变形累积特性。

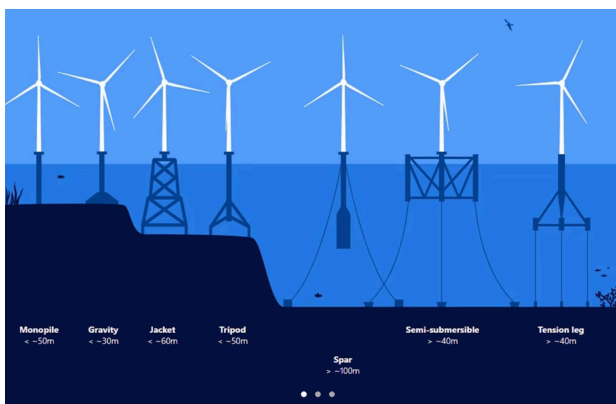


图 1: 海洋风电基础类型

## 二、 研究内容

### 1. 单桩及其荷载类型

- (1) 柔性桩和刚性桩 ( $L/D$ ): 欧洲一般采用大直径刚性桩，一般直径在 8 米以上。
- (2) 桩顶转动不能超过 0.5 度，一般设计在 0.3 度左右。
- (3) 垂直荷载：塔和基础本身的重力一对桩基变形影响可以忽略不计。
- (4) 侧向荷载：海浪和风载一导致侧向变形。设计中需要考虑单调和循环加载。砂土中一般考虑排水条件（密砂），虽然在部分时候是不排水（特别是对应大直径单桩）。

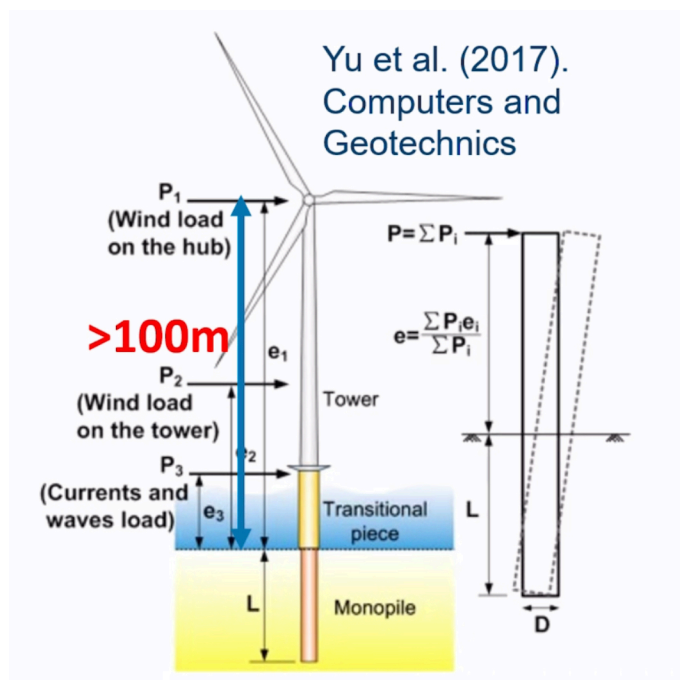


图 2: 单桩及其荷载类型

## 2. 有限元计算中的本构模型

- (1) 单调加载: 部分简单模型可用, 例如硬化模型和硬化小应变模型。
- (2) 循环加载: 现有本构模型都较复杂, 无法用于工程设计; 应变软化导致的单元依存性问题; 大次数循环 (超过 1000 次) 模拟的计算时间问题; 大次数循环的数值计算误差累积问题。
- (3) 循环加载的简化有限元算法: 循环跳跃算法和刚度折减法。
- (4) 循环加载变形累积的其他算法 (不做介绍): 如 Macro-element 和 Hyperplastic Accelerated Ratcheting Model(HARM)。

## 3. 简化算法的主要优点和问题

- (1) 循环跳跃: 累积应变公式可以考虑多种因素的影响, 但是会导致有限元计算的收敛性问题; 主要用于研究, 尚未用于设计。累积应变增量的大小和方向只和当前应力方向有关, 不考虑边界条件的影响
- (2) 刚度折减: 因为方法简单, 已被用于设计; 但是基础本构模型不合理 (弹性完全塑性本构模型, : 刚度折减过程中的剪胀描述不合理; 不适合多个循环加载包的计算 (第 N 个循环需要重启计算)。

## 4. B-SDM 模型

- (1) 基于 Achmus et al. (2009) 刚度折减框架, 边界面本构模型一适合第一个应力循环。
- (2) 刚度折减法一考虑剪应变和体应变的累积, 可用于多个循环包的计算 -连续计算过程, 参数可通过室内试验确定。

### 三、 研究过程

#### 1. B-SDM 三轴压缩试验

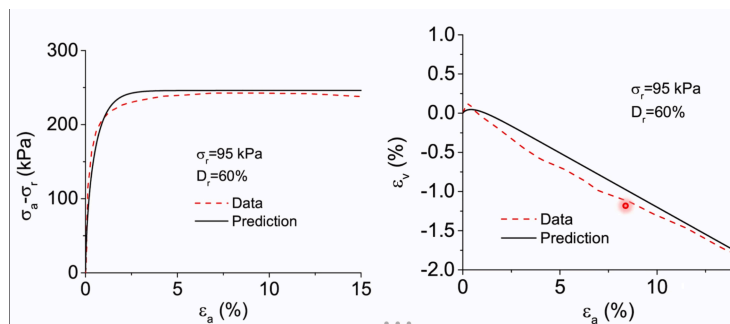


图 3: 三轴压缩试验结果

#### 2. B-SDM 第一个循环

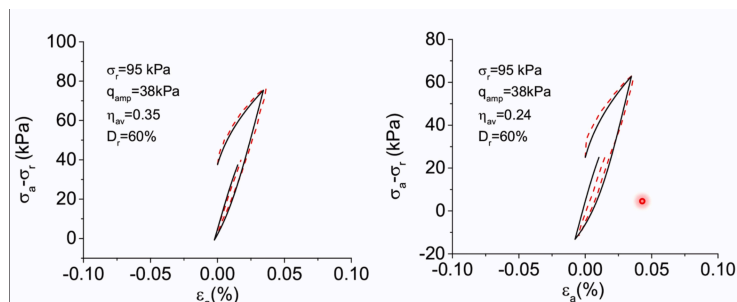


图 4: 第一个循环结果

#### 3. 循环应变积累

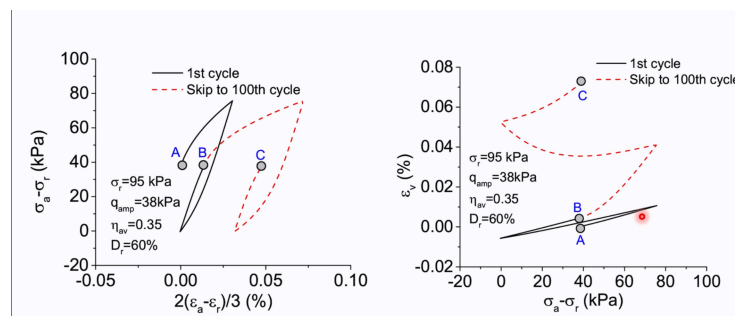


图 5: 循环应变积累结果

#### 4. B-SDM 刚度折减中的剪胀性

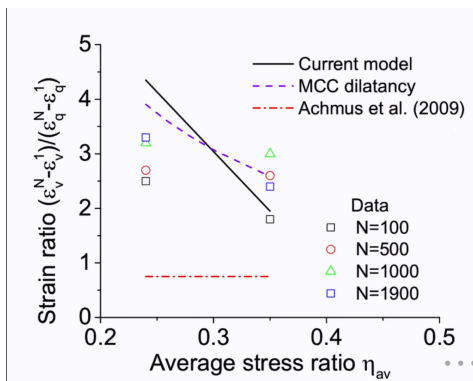


图 6: 刚度折减中的剪胀性

- Achmus et al. (2009) 模型预测明显偏离数据
- 现有模型和修正剑桥模型高估低应力比时的体积变形
- 需要更多实验和理论改进

#### 四、 研究结论

- 刚度折减算法：边界面模型 + 刚度折减公式
- 可应用于其他本构模型：剪应变和体应变可以同时考虑
- 模型参数可以通过三轴循环加载试验确定
- 单桩循环加载变形主要特性可以合理预测
- 刚度折减阶段的剪胀性尚需要更多改进（实验数据和理论）
- 离心机或者现场试验的验证
- 打桩过程对单桩变形特性的影响