

# 海上风电超大直径钢管桩竖向承载特性影响因素分析

尹瑞龙<sup>1,2,3</sup>, 袁方龙<sup>1,2,3</sup>, 赵栋辉<sup>1,2,3</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司; 2. 中交第一航务工程局有限公司;

3. 港口岩土工程技术交通运输行业重点实验室)

**摘 要:** 为了研究海上风电超大直径钢管桩基础的竖向承载特性, 文中采用 Abaqus 建立钢管桩有限元模型, 得到了超大直径钢管桩竖向荷载的传递机理及桩身入土深度、桩径、壁厚、桩土界面摩擦系数和土体参数等多种因素对超大直径钢管桩竖向承载力的影响。研究得出: 超大直径钢管桩竖向承载力主要由内侧摩阻力和外侧摩阻力承担, 占比 90% 以上; 外侧摩阻力先于内侧摩阻力发挥作用, 外侧摩阻力沿桩身线性增大, 内侧摩阻力只在桩端处发挥作用; 超大直径钢管桩竖向承载力随桩身入土深度、桩径及界面摩擦角的增大而增大, 壁厚和界面摩擦角对此影响较小; 增大桩身入土深度对超大直径钢管桩的竖向承载力提升最为明显。

**关键词:** 超大直径钢管桩; 竖向承载力; 有限元分析; 参数影响

## 0 引言

我国海上风能资源储量大, 可利用的海域面积超过 300 万 km<sup>2</sup>, 2021 年底我国海上风电规模已达到世界第一<sup>[1]</sup>。在海上风电基础设计中, 单桩基础因适用性和经济性较好而应用较为广泛。随着我国海上风电单机容量规模的增大, 超大直径钢管桩直径最大可达 10 m, 桩长可达 100 多 m。

现有规范中缺少适用于超大直径钢管桩竖向承载力的计算方法, API 规范<sup>[2]</sup>中对于超大直径钢管桩的界定是直径  $\geq 1.8$  m, 显然不符合实际工程, 故诸多学者对于超大直径钢管桩的竖向承载特性进行了研究, 研究方式有试验、理论分析和有限元模拟。Lehane 等<sup>[3]</sup>开展了一系列砂土中钢管桩的承载力现场试验, 分析了初始应力、桩径、壁厚等影响因素; 胡利文等<sup>[4]</sup>分析了钢管桩的竖向承载机理, 认为竖向承载力应考虑入岩深度和土塞效应; 倪敏<sup>[5]</sup>基于有限元对钢管桩竖向极限承载力进行了研究, 得出大直径钢管桩竖向承载力计算公式仅需考虑桩径对桩端阻力的修正。刘润等<sup>[6]</sup>开展了超大直径钢管桩的离心机试验, 并研究了砂土中钢管桩内侧摩阻力的作用规律。

综上所述, 海上风电超大直径钢管桩竖向承载力在作用规律方面的研究取得了一定的进展, 而竖向荷载的传递机理并未说明, 桩属性和土属性对其影响规律缺少系统性的研究。确定超大直径钢管桩竖向承载力最有效的方法是现场静载试

验, 但海上试桩环境复杂, 试验难度较大, 且检测成本较高, 数据真实性和体量有限, 对此, 诸多学者更倾向于采用数值模拟的方法开展研究。本文采用数模软件建立三维桩—土实体模型, 系统地研究了超大直径钢管桩的竖向荷载传递机理, 并详细分析了超大直径钢管桩竖向承载力的影响因素。

## 1 竖向承载力计算方法

钢管桩竖向承载力的计算方法可分为 2 种: 一种是按闭口桩计算, 即竖向承载力为外侧摩阻力和桩端圆形截面阻力之和; 另一种是按开口桩计算, 即竖向承载力为内侧摩阻力、外侧摩阻力和桩端环形截面阻力, 2 种计算结果取较小值作为钢管桩的竖向承载力。闭口桩与开口桩的界定标准尚无定论, 桩径越小, 越不易形成土塞, 闭口效果越好; 桩径越大, 土塞则越不闭塞, 而超大直径钢管桩由于桩径较大, 土塞处于完全不闭塞状态, 即竖向承载力为内侧摩阻力、外侧摩阻力、桩端环形截面阻力之和。

目前计算钢管桩竖向承载力的规范有 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》<sup>[7]</sup>、JTS 167—2008《码头结构设计规范》<sup>[8]</sup>、API 规范<sup>[2]</sup>、DNV 规范<sup>[9]</sup>。规范法中桩基竖向承载力计算公式包含侧摩阻力与桩端阻力, 单位侧摩阻力和单位桩端阻力由查表法或无量纲系数与土体参数相乘可得, 其中单位侧摩阻力的取值和单位端阻力的取值直接影响

钢管桩的竖向承载力。

## 2 桩基承载特性研究

### 2.1 有限元模型的建立

依据海上风电钢管桩基础试验,采用 Abaqus 有限元软件建立超大直径钢管桩计算模型。其中桩径  $D=4$  m, 桩长  $L_0=52$  m, 入土深度  $L=50$  m, 壁厚  $t=84$  mm。桩身采用生死单元置于砂土层中<sup>[10]</sup>, 钢管桩密度为  $7\,850\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $210\text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.2$ 。土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 饱和密度为  $1\,930\text{ kg/m}^3$ , 摩擦角为  $35.6^\circ$ , 弹性模量为  $15\text{ MPa}$ , 泊松比为  $0.3$ 。

有限元模型侧面同时施加  $x$  向和  $y$  向位移约束, 底面施加  $x$  向、 $y$  向和  $z$  向约束。为消除边界效应的影响, 模型直径取 20 倍桩径, 高度取 2 倍桩身入土深度<sup>[11]</sup>。为了更好地模拟桩身与周围土体的摩擦接触及法向分离现象, 法向接触采用 Coulomb 摩擦接触, 接触界面法向为硬接触, 切向采用罚函数, 摩擦系数取  $\tan(2\varphi/3)=0.44$ 。设置参考点, 与桩顶表面进行耦合, 对其施加竖向位移荷载。钢管桩施加重力, 土体施加重力和预应力场。网格划分经过计算分析, 径向网格采用单精度布种  $0.5\sim 2D$ , 竖向网格采用均匀布种  $0.025L$ 。超大直径钢管桩有限元模型如图 1 所示。

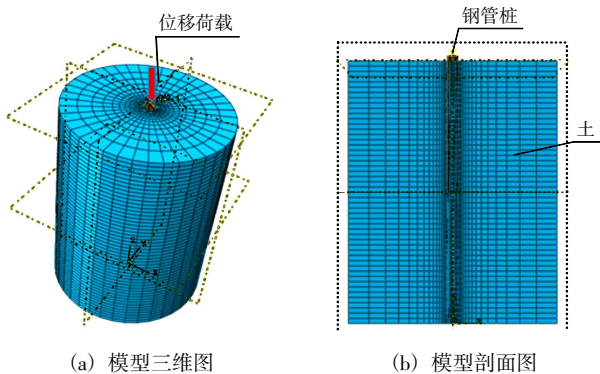


图 1 超大直径钢管桩有限元模型

### 2.2 模型验证

为验证有限元方法分析超大直径钢管桩竖向承载力的可行性, 以刘润等<sup>[6]</sup>开展的桩径  $D=4$  m 离心机试验作为验证试验。建立钢管桩模型, 在桩顶施加向下的位移荷载  $1.6\text{ m}$ , 提取桩顶荷载和桩身竖向位移曲线, 与离心机试验结果对比可知, 有限元计算的超大直径钢管桩竖向极限承载力为  $74.5\text{ MN}$ , 与离心机试验结果基本一致, 表明此建模方法能较好地反映超大直径钢管桩竖向承载特

性。有限元模型验证见图 2。

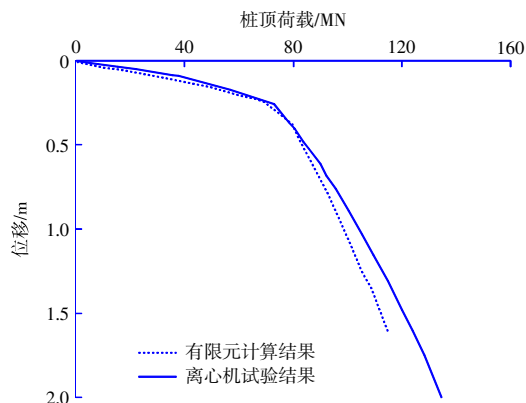


图 2 有限元模型验证

### 2.3 钢管桩竖向荷载传递机理

提取不同位移荷载工况下的钢管桩内侧摩阻力和外侧摩阻力如图 3、图 4 所示。 $S_v$  为钢管桩施加的竖向位移荷载, m。

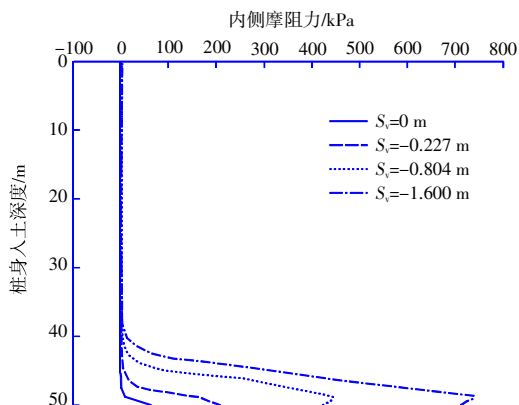


图 3 不同荷载下的内侧摩阻力沿深度发挥规律

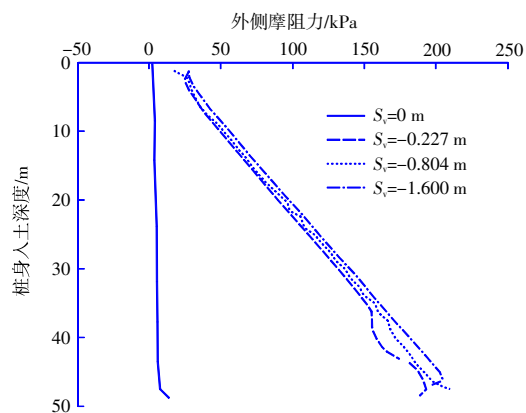


图 4 不同荷载下的外侧摩阻力沿深度发挥规律

由图 3、图 4 可知, 钢管桩在竖向受荷条件下, 桩内侧摩阻力与外侧摩阻力发挥规律是不同

的,内侧摩阻力集中在桩端处发挥作用,外侧摩阻力沿桩身全深度发挥作用,内侧摩阻力和外侧摩阻力均随竖向荷载的增大而增大。内侧摩阻力的作用范围和值大小均随竖向荷载的增大而增大,作用范围内的内侧摩阻力沿桩身入土深度的增大而线性增大。当竖向荷载为0时,外侧摩阻力基本为0;当竖向荷载大于0时,外侧摩阻力沿桩身入土深度的增大而线性增大,但不随竖向荷载增大。桩端处的内侧摩阻力大于外侧摩阻力。

提取不同位移荷载下的桩顶荷载,计算其外侧摩阻力、内侧摩阻力和桩端环形截面端阻力,结果如表1所示。由表1可知,超大直径钢管桩竖向承载力主要由外侧摩阻力和内侧摩阻力承担,占比90%以上;随着桩顶竖向荷载的增大,内侧摩阻力占比逐渐增大,外侧摩阻力占比逐渐减小,桩端环形截面端阻力占比逐渐增大,但其值仍然较小。

表1 不同荷载下的钢管桩内侧摩阻力、外侧摩阻力和桩端环形截面端阻力

竖向承载力/ MN	内侧摩阻力/ MN	外侧摩阻力/ MN	桩端环形截面端阻力/ MN	内侧摩阻力占比/%	外侧摩阻力占比/%	桩端环形截面端阻力占比/%
13.28	0.32	12.85	0.10	2.41	96.81	0.78
32.94	1.03	31.20	0.71	3.13	94.70	2.17
78.03	6.82	68.86	2.35	8.74	88.25	3.01
104.41	26.83	70.00	7.58	25.70	67.04	7.26
114.78	34.67	70.80	9.31	30.20	61.68	8.11

超大直径钢管桩在沉桩过程中,由于中间是空的,桩端土体会被挤入到管桩的内部形成土塞,进入管桩内部的桩端土体部分被挤密,从而导致桩端处的内侧摩阻力大于外侧摩阻力。桩顶荷载为0时,桩土之间无相对位移,故内侧摩阻力和外侧摩阻力基本为0。随着桩顶荷载的增大,外侧摩阻力最先发挥作用,沿桩身入土深度的增大而线性增大。当桩顶荷载传递到桩端时,桩端阻力开始发挥作用,且由于土体的变形大于钢管桩自身的变形,桩端部分土体会进入桩内,产生相对于管壁向上的位移,内侧摩阻力开始发挥作用,管桩内部土塞上部分土体与管桩内壁无相对位移,故内侧摩阻力在此区域为0。外侧摩阻力是自上而下发挥作用,内侧摩阻力是自下而上发挥作用,且作用范围为距桩端某一距离内。

3 桩基竖向承载力影响因素分析

3.1 桩身入土深度的影响

以图1中的模型为基础,桩径 $D=4\text{ m}$ ,分别建立桩身入土深度 $L$ 为20 m、40 m、60 m、80 m、100 m的超大直径钢管桩模型,其它参数保持不变,图5为不同桩身入土深度下的荷载位移曲线。由图5可知,随着桩身入土深度的增大,钢管桩竖向极限位移和竖向极限承载力均增大,而且越是增大桩身入土深度,钢管桩竖向承载力的提升越明显。当桩身入土深度为20 m时,钢管桩竖向极限承载力为9.96 MN,当桩身入土深度增大至100 m时,钢管桩竖向极限承载力为255.26 MN,即桩身入土深度增大至5倍,竖向承载力增大至约25倍。

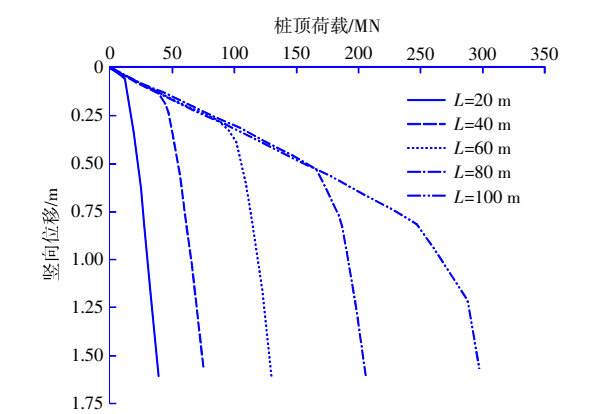


图5 不同桩身入土深度下的钢管桩竖向承载力

3.2 桩身直径的影响

以图1中的模型为基础,桩身入土深度 $L$ 为50 m,建立桩径 $D$ 分别为2 m、4 m、6 m、8 m、10 m的超大直径钢管桩模型,其它参数保持一致,图6为不同桩径下的荷载位移曲线。

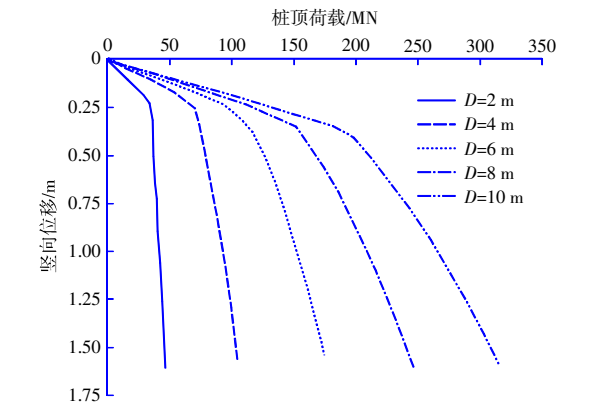


图6 不同桩径下的钢管桩竖向承载力

由图6可知,随着桩径的增大,钢管桩竖向

极限位移和竖向极限承载力均增大,且钢管桩桩径的增大对竖向极限位移增大效果较小,对竖向极限承载力增大效果较为显著。当桩径为 2 m 时,钢管桩竖向极限承载力为 34.75 MN,当桩径增大至 10 m 时,钢管桩竖向极限承载力为 196.10 MN,即桩径增大至 5 倍,竖向承载力增大约 6 倍。

### 3.3 桩身壁厚的影响

以图 1 中的模型为基础,桩身入土深度  $L=50$  m,桩径  $D$  为 4 m,建立壁厚  $t$  分别为 60 mm、80 mm、100 mm、150 mm、200 mm 的超大直径钢管桩模型,其它参数保持一致,图 7 为不同壁厚下的荷载位移曲线。由图 7 可知,不同壁厚下的钢管桩竖向极限位移和极限承载力基本一致,增大壁厚对提升钢管桩竖向承载力无明显效果,故只考虑钢管桩竖向受荷时,壁厚仅需满足最小壁厚的要求即可。API 规范<sup>[2]</sup>中提出了满足最小壁厚的安全条件,即钢管桩的最小壁厚不应小于:

$$t=6.35+D/100 \quad (1)$$

式中:  $t$  为壁厚, mm;  $D$  为桩径, mm。

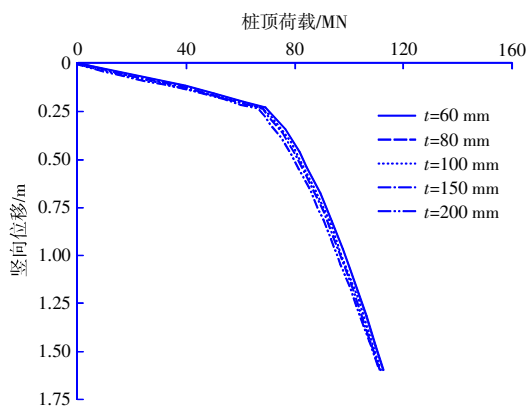


图 7 不同壁厚下的钢管桩竖向承载力

### 3.4 界面摩擦系数的影响

Abaqus 软件中对于桩土接触的常用模拟方法有无摩擦、罚函数、粗糙、Lagrange 乘子法等。其中罚函数是较为常用的,它可以定义桩土间摩擦系数,罚函数中摩擦系数取 0 等同于无摩擦,取 1 则等同于粗糙。桩土之间切向作用一般选取库仑摩擦,可用式(2)表示:

$$\tau_{\text{crit}}=\min(\mu p, \tau_{\text{max}}) \quad (2)$$

式中:  $\tau_{\text{crit}}$  为临界状态时的剪应力, kPa;  $\mu$  为摩擦系数,无量纲;  $p$  为法向接触压力, kPa;  $\tau_{\text{max}}$  为用户指定的剪应力极限, kPa。

以图 1 中的模型为基础,桩身入土深度  $L=50$

m,桩径  $D$  为 4 m,壁厚  $t=84$  mm,建立桩土界面摩擦系数  $\mu$  分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 的超大直径钢管桩模型,其它参数保持一致,图 8 为不同界面摩擦系数下的荷载位移曲线。由图 8 可知,随着界面摩擦系数的增大,钢管桩竖向极限位移和竖向极限承载力均增大。且界面摩擦系数越大,钢管桩竖向承载力增长越缓慢,说明界面摩擦系数较小时对钢管桩竖向承载力的影响较为显著。当界面摩擦系数为 0.1 时,钢管桩竖向极限承载力为 12.57 MN,当摩擦系数增大至 0.9 时,钢管桩竖向极限承载力为 130.44 MN,即界面摩擦系数增大至 9 倍,竖向极限承载力增大至约 10 倍。

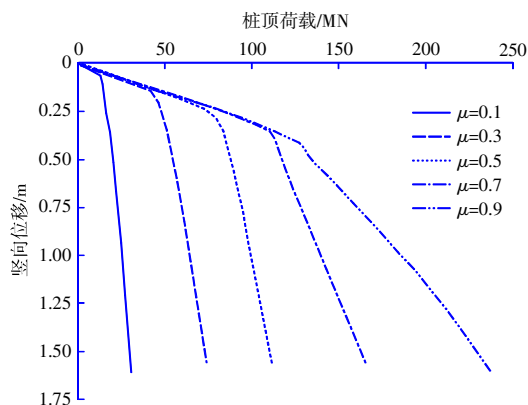


图 8 不同界面摩擦系数下的钢管桩竖向承载力

### 3.5 土体性质的影响

本文研究土体以砂土为例,以图 1 中的模型为基础,桩身入土深度  $L=50$  m,桩径  $D=4$  m,壁厚  $t=84$  mm,桩土界面摩擦系数  $\mu=0.44$ ,建立土体内摩擦角  $\varphi$  分别为 25°、30°、35°、40°、45° 的超大直径钢管桩模型,其它参数保持一致,图 9 为不同内摩擦角下的荷载位移曲线。

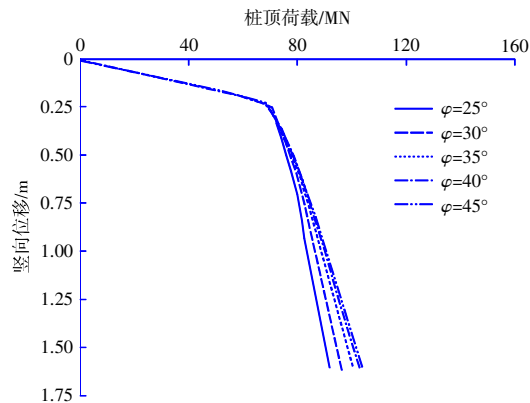


图 9 不同土体内摩擦角下的钢管桩竖向承载力

由图9可知,随着土体内摩擦角的增大,超大直径钢管桩竖向极限承载力并未增大,而达到竖向极限承载力之后,内摩擦角越大竖向承载力越大,但变化较小。

#### 4 结语

围绕着超大直径钢管桩竖向承载力,采用有限元软件分析了竖向荷载传递的作用规律,并建立了多种因素影响下的钢管桩竖向受荷模型,揭示了桩身入土深度、桩径、壁厚、界面摩擦角和土体内摩擦角与竖向承载力的关系,得出:

1) 超大直径钢管桩在竖向受荷条件下,外侧摩阻力最先发挥作用,沿桩身线性增大,自上而下发挥作用;桩顶荷载继续增大,内侧摩阻力在桩端处发挥作用,桩身上部不发挥作用,沿桩身线性增大,自下而上发挥作用;内侧摩阻力发挥作用滞后于外侧摩阻力发挥作用。

2) 超大直径钢管桩是摩擦性桩,内侧摩阻力和外侧摩阻力占竖向承载力的90%以上,内侧摩阻力占比随桩顶荷载的增大而增大,外侧摩阻力占比随桩顶荷载的增大而逐渐减小。

3) 超大直径钢管桩竖向承载力随桩身入土深度的增大、桩径的增大及界面摩擦角的增大而增大,壁厚及土体内摩擦角对此影响较小。

4) 从多种因素综合考量,增大桩身入土深度对超大直径钢管桩竖向承载力提升最为明显,桩

身入土深度增大至5倍时,竖向承载力增大至25倍;增大桩径对超大直径钢管桩竖向承载力较为明显,桩径增大至5倍时,竖向承载力增大至6倍;增大界面摩擦系数对超大直径钢管桩也较为明显,界面摩擦系数增大至9倍,竖向承载力增大至10倍。

#### 参考文献:

- [1] 白旭. 中国海上风电发展现状与展望[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 12-15.
- [2] American Petroleum Institute (API). Geotechnical and foundation design considerations[S]. Washington: API, 2011.
- [3] LEHANE B M, GAVIN K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(6): 473-480.
- [4] 胡利文, 贾德庆, 傅洁馨, 等. 开口钢管桩承载力影响因素[J]. 水运工程, 2005(9): 17-22.
- [5] 倪敏. 大直径钢管桩竖向承载能力研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [6] 刘润, 韩德卿, 梁超, 等. 砂土中超大直径钢管桩内侧摩阻力研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1067-1075.
- [7] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [8] JTS 167—2008, 码头结构设计规范[S].
- [9] DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine structures[S].
- [10] 蒋万里, 朱国甫, 张杰. 单桩承载力的一种直接动测法[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3500-3508.
- [11] LI X, GAUDIN C, TIAN Y, et al. Effect of perforations on uplift capacity of skirted foundations on clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(3): 322-331.