

基于自平衡法的竖向荷载下斜桩承载力分析

徐 腾¹, 徐晓东¹, 朱佩宁², 邓琴华², 陈伟杰¹, 苏楚源¹, 丁 亮¹

(1. 广东电网有限责任公司 潮州供电局, 潮州 521051;
2. 广东天信电力工程检测有限公司, 广州 510663)

摘 要: 为研究竖向荷载作用下斜桩的承载规律及自平衡法检测斜桩承载力的适用性, 建立桩土有限元数值模型, 模拟不同桩身倾角条件下堆载法和自平衡法的试桩过程, 分析荷载-位移曲线、桩身应力分布及地基变形特征, 并计算自平衡转换系数。结果表明: 桩身倾斜会降低竖向承载力, 倾角 8° 时堆载法极限承载力为 6 553.31 kN, 较竖直桩降低 5.45%; 自平衡法沿桩身轴向加载, 加载位置位于桩身平衡点处, 可充分发挥桩深层侧摩阻力和端阻力, 等效转换后极限承载力为 7 622.91 kN, 较堆载法增大 16.32%; 自平衡法加载过程中桩体受力均匀, 无弯曲变形和桩土脱空现象, 对桩周土体扰动小。因此, 自平衡法能更准确检测复杂工程条件下斜桩的竖向承载力, 优于传统堆载法。

关键词: 自平衡法; 斜桩; $Q-s$ 曲线; 堆载法; 竖向荷载

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0109-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.018

Bearing Capacity Analysis of Inclined Pile under Vertical Load by O-cell Method

XU Teng¹, XU Xiaodong¹, ZHU Peining², DENG Qinhua², CHEN Weijie¹, SU Chuyuan¹, DING Liang¹

(1. Chaozhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Chaozhou 521051, China;
2. Guangdong Tianxin Electric Power Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: To investigate the bearing behavior of inclined piles under vertical loads and the applicability of the O-cell method for detecting the bearing capacity of inclined piles, a finite element numerical model of the pile-soil system was established. The loading processes of the surcharge method and the O-cell method were simulated under different pile inclination angles (0°, 4°, 8°, 12°). The load-displacement curves, stress distribution along the pile, and deformation characteristics of the foundation were analyzed, and the conversion coefficient of the O-cell method was calculated. The results indicate that pile inclination reduces the vertical bearing capacity. At an inclination angle of 8°, the ultimate bearing capacity obtained by the surcharge method is 6 553.31 kN, which is 5.45% lower than that of the vertical pile. The O-cell method applies the load axially along the pile at the equilibrium point, which can fully mobilize the deep lateral friction and end resistance of the pile. After equivalent conversion, the ultimate bearing capacity is 7 622.91 kN, which is 16.32% higher than that obtained by the surcharge method. During the loading process of the O-cell method, the pile body is uniformly stressed without bending deformation or soil-pile

作者简介: 徐 腾 (1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

通信作者: 朱佩宁 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 地基与桩基检测。

收稿日期: 2024-08-30

岩土力学

separation, and the disturbance to the surrounding soil is small. Therefore, the O-cell method can more accurately detect the vertical bearing capacity of inclined piles under complex engineering conditions and is superior to the traditional surcharge method.

Key words: o-cell method; inclined pile; Q -curve; static surcharge method; vertical load

0 引言

海上风能作为一种新型、环保、储量巨大的再生能源,近些年来逐渐成为世界范围内新能源领域关注的焦点。据全球风能理事会(GWEC)统计预测:2030年全球风电机装机总量将达到2 000 GW,全球20%的电力将来自风能^[1]。在沿海电力建设工程快速发展背景下,越来越多的风电设施和电力厂站向大型化和深水域发展,对工程设计提出了更高的要求。由此,复杂环境下沿海电力建设工程中桩基的承载能力是需要重点关心和解决的问题^[2]。

沿海或海上的电建工程中桩基础的应用通常以单桩形式存在^[3]。徐江等^[4]提出,由于工程建设的需要,海上风电机组、大型输电塔杆中的桩常常被设计为斜桩;张祖涛^[5]等、王淞^[6]等的研究说明,由于施工原因或地层不均匀沉降,垂直桩在使用过程中也会发生倾斜,很多海上作业平台,斜桩基础也被广泛采用抵御波浪荷载。由于斜桩的使用形式多样,倾斜程度不一,所以系统讨论斜桩群桩基础的研究较少,仅有一些学者根据具体工程案例对固定的斜桩组合形式进行研究,Wang等^[7]基于轴向静载对斜桩单桩轴向和横向承载力进行了研究;Bharathi等^[8]对斜桩群桩的动力响应进行了模拟;Wang等^[9]对海上斜桩群桩基础抗波浪力进行了数值分析。当下对桩基竖向承载力的大部分研究多集中在直桩单桩或斜桩群桩基础,少有学者对斜桩单桩基础进行研究。Ashour等^[10]的研究提出,对于斜桩单桩基础,目前的研究也大多集中在沿桩体倾斜方向上的受力分析,很少讨论斜桩单桩的竖向承载性能。Goit等^[11]、Liu等^[12]和根据斜桩模型试验结果得出:轴向荷载作用下斜桩的桩土相互作用与竖向荷载作用下的竖直桩相同,径向荷载作用下的斜桩等同于水平荷载作用下的竖直桩。胡利文等^[13]和Xu等^[14]通过研究论证:自平衡试桩法作为一种不受场地限制、成本低、易于操作的桩基承载力检测方法,在大承载力和深基础试验中具有独

特的优势。

自平衡法通过在桩平衡点位置安装荷载箱进行加载,不仅可以很好地解决上述问题,对于斜桩还可以从荷载箱位置沿桩轴向施加荷载,从而检测加载过程中斜桩的实际破坏状态。Choi等^[15]的研究已经将该方法在海上桩基工程中进行了应用。但是自平衡试桩结果无法直接用于判断桩基的承载力,而是需要将上段桩的极限承载力进行等效转换,王瀚萱等^[16]和王卿等^[17]将目前常用的转换方法进行了总结,包括等位移法、等荷载法、简化法、精确法、数值计算法等。

以往的研究往往仅为单方法的应用,常难以准确给出实际的转换系数和承载力大小。将等位移法和数值计算法进行结合,进一步推导斜桩自平衡转换系数的计算过程,通过建立桩土数值模型,模拟并研究了自平衡法和堆载法两种试验方法下斜桩的荷载传递规律,讨论斜桩倾角对竖向承载力的影响,通过对比自平衡法和传统堆载法,验证了自平衡法在斜桩承载力测试中的优势。

1 计算模型建立

1.1 模型参数设定

竖向荷载作用下斜桩的受力特征不同于竖直桩,由于桩身倾斜,作用于桩顶的竖向荷载可以分解为沿桩身的轴向力 Q_y 和垂直于桩身的径向力 Q_x ,如图1所示,竖向荷载下斜桩受力变形可分解为轴向荷载下的压缩变形和径向荷载下的弯曲变形。

基于ABAQUS有限元数值平台对堆载法和自平衡法加载过程和桩体的受力状态进行仿真分析,模型的基本假定如下:

桩材选择工程中的常规混凝土桩,强度C30,桩身设为连续均质弹性体,采用线弹性模型;土体选择滨海地区软黏土,设为理想均质弹塑性材料,各有限元网格单元物理、力学性质相同,服从摩尔-库伦屈服准则,具体材料参数见表1。

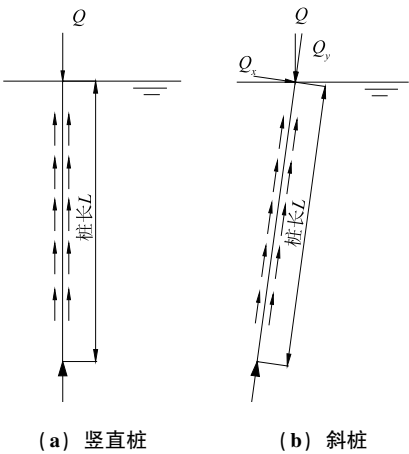


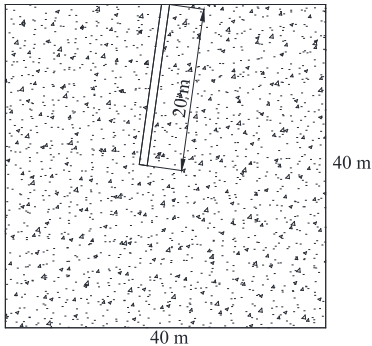
图1 竖向荷载作用下竖直桩与斜桩荷载传递规律示意图
Fig.1 Schematic diagram of load transfer law of vertical pile and inclined pile under vertical load

在桩土接触界面设置接触单元，考虑桩与桩周土体接触状态的变化，设桩与桩周土体协调变形，分析过程中假定桩土之间摩擦系数不变；

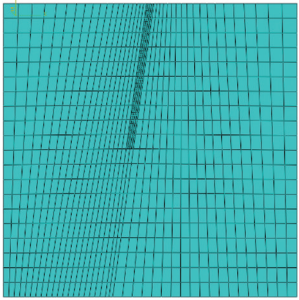
仿真模拟基于1：1比例尺建立，桩体模型设为 $L \times D = 20\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的圆柱体，为消除尺寸效应的影响，地基模型高度取桩长20倍，宽度取桩径40倍，由此地基模型简化为 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 的立方体，如图2（a）所示，根据模型的轴对称性，简化为1/2模型进行分析；桩、土模型均采用实体单元，网格单元类型选择C3D8，对桩体和靠近桩体附近的土单元网格进行加密，如图2（b）所示，以增进计算结果的准确性，减少计算量。

表1 桩土模型参数

Table1 Main scalars of test pile and soil					
	弹性模量 /kPa	泊松比	单位重度 /（kN/m ³ ）	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /（°）
土层	100 000	0.25	21	45	40
桩	30 000 000	0.20	28		



(a) 桩-土模型



(b) 网格划分
图2 桩土模型和网格
Fig.2 Pile-soil model and grid division

1.2 数值分析方案

有限元模型分别模拟了实际工况下竖直桩和斜桩在两种试桩方法下的受力情况。为了更好地研究斜桩倾角角度对竖向承载力和荷载传递规律的影响，分别建立竖直桩模型以及不同倾角角度的斜桩模型，并通过对传统堆载试验和自平衡试验两种试桩方法，分析自平衡法相对于传统堆载法在斜桩承载力检测上的优势，分析方案见表2。

表2 数值分析方案

Table 2 Summary of numerical analysis scheme		
方案组	倾角 $\theta / (^{\circ})$	试桩方法
No. 1	0	堆载法
No. 2	0	自平衡法
No. 3	4	堆载法
No. 4	8	堆载法
No. 5	8	自平衡法
No. 6	12	堆载法

2 计算结果分析

2.1 桩身倾角对竖向承载力的影响

通过四组桩顶堆载试桩模型，模拟分析不同倾角下桩的荷载-位移曲线，对比结果如图3所示。倾角为 0° 、 4° 、 8° 、 12° 下桩的极限承载力（对应极限位移 0.05 m ）分别为6 931.13、6 731.85、6 553.31、6 340.34 kN，桩的极限承载力随倾角的增大而减小。与竖直桩（ $\theta = 0^{\circ}$ ）相比，倾斜桩（ θ 为 4° 、 8° 、 12° ）的极限承载力分别降低2.87%、5.45%、8.52%。可见相同地层和荷载条件下，桩身倾斜将引起竖向承载力的折减，桩的极限承载力随着桩身倾角的增大而减小，这说明相同条件下竖直成桩比倾斜成桩具有更大的承载能力，桩身倾斜将会降低桩

岩土力学

的承载性能。同一荷载等级 ($Q = 6\,000\text{ kN}$) 下, θ 分别为 0° 、 4° 、 8° 、 12° 时, 桩顶竖向位移分别对应为 $0.032\,6$ 、 $0.035\,5$ 、 $0.038\,9$ 、 $0.042\,7\text{ mm}$ 。对于倾斜角度为 4° 、 8° 、 12° 的斜桩, 竖向荷载为 $6\,000\text{ kN}$ 时的桩顶竖向位移相对于竖直桩分别增大了 8.90% 、 19.33% 、 30.98% , 这也说明了随着桩身倾斜角度的增大, 桩的竖向承载力将减小。

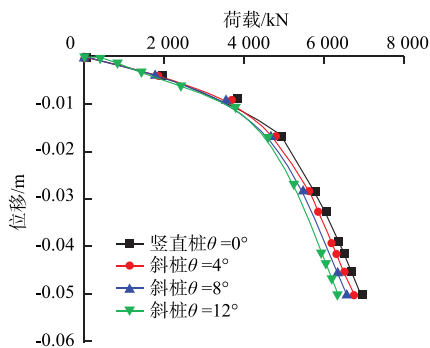
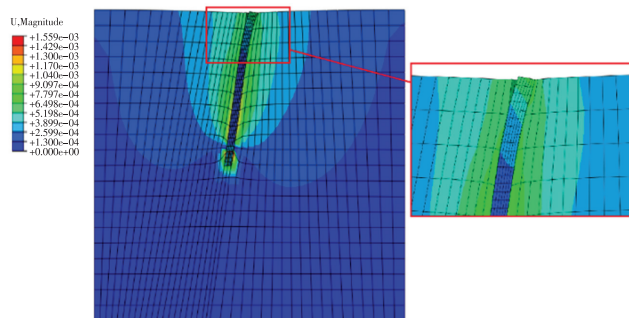


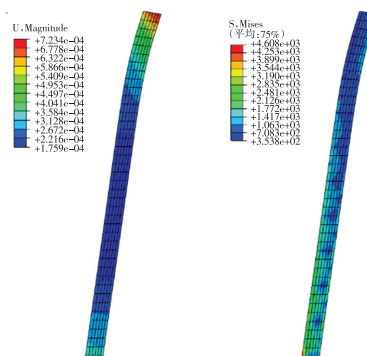
图3 不同倾角斜桩模型的堆载试验结果

Fig. 3 Static surcharge test results of inclined pile models with various inclination angles

由图4可知, 在桩顶荷载作用下, 桩周土体将产生沉降变形, 对于均匀土层中的竖直桩, 桩周土体沉降将对称分布, 而斜桩的桩周土体呈现非对称分布。在土层表面, 背斜侧的土体的位移等值线范围更大, 说明背斜侧表面土层的沉降范围和沉降量更大, 向斜侧土体位移等值线范围明显小于背斜侧。随着桩顶荷载的施加, 桩前土体受到挤压作用, 产生变形, 桩后土体随桩体发生沉降变形, 当荷载施加到一定程度, 桩后土体在土层表面的小范围内将与桩体分开, 产生脱空现象。图4(b)为斜桩的变形云图, 在受荷位置处, 即桩顶处, 产生最大变形, 随着深度的增加桩体变形量减小, 嵌固段的变形量最小, 斜桩的变形与竖直桩不同, 向斜侧产生的位移更大, 背斜侧产生的位移更小, 桩体变形分布不均, 在桩顶处桩段产生弯曲变形。图4(c)为桩体的 Mises 应力云图, 随着桩深增加米塞斯应力逐渐增大, 在桩体表面呈非均匀分布, 在嵌固段, 背斜侧的应力值相对向斜侧更大, 应力分布范围更广, 这是因为在竖向荷载垂直于桩身的径向分力作用下, 桩产生弯曲变形, 若将桩端视为固定端, 桩的弯曲变形可近似为绕桩端产生微小转动, 在桩端附近, 桩的背斜侧将与土体之间产生更大的挤压力。



(a) 桩土地基沉降云图



(b) 桩体变形云图

(c) 桩体 Mises 应力云图

图4 $\theta = 8^\circ$, $Q = 600\text{ kN}$ 堆载法试桩条件下桩土地基沉降及桩体 Mises 应力云图, 变形缩放系数 = 1 000

Fig. 4 Foundation deformation in conditions with $\theta = 8^\circ$ and Mises stress of pile ($Q = 600\text{ kN}$, Static surcharge test), deformation scale factor = 1 000

2.2 转换系数计算

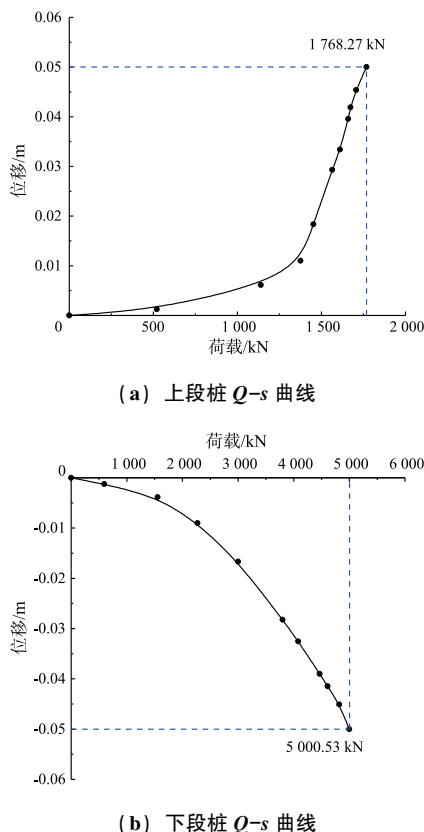
将自平衡试桩结果向竖向抗压桩进行等效转换是自平衡试桩的关键, 将数值计算与等位移法和等荷载法相结合对转换系数进行计算。由图5可知, 上下段桩体的 $Q-s$ 曲线均为缓变型曲线, 对于缓变型曲线, 极限位移值取 $0.05D = 50\text{ mm}$ (D 为桩径), 达到极限位移值所对应的荷载值为桩的极限承载力, 上段桩的极限承载力为 $Q_u = 1\,768.27\text{ kN}$, 下段桩的极限承载力 $Q_d = 5\,000.53\text{ kN}$ 。

传统堆载试桩方法下, 桩承载力可由桩顶达到极限位移时的受荷大小确定, 任一时刻下桩承载力 Q 由侧摩阻力 Q_s 和端阻力 Q_p 两部分组成, 公式为:

$$Q = Q_s + Q_p \quad (1)$$

对于自平衡试桩法, 所测得承载力则由上、下段桩的极限荷载组成, 自平衡等效桩顶荷载 Q 的计算公式如下:

岩土力学

图5 自平衡法检测竖直桩模型 $Q-s$ 曲线, $\theta = 0^\circ$ Fig.5 $Q-s$ curve of vertical pile model, O-cell test, $\theta = 0^\circ$

$$Q = \frac{Q_u - W}{\gamma_1} + Q_d \quad (2)$$

式中: Q_u 为荷载箱作用于上段桩的荷载; Q_d 为荷载箱作用于下段桩的荷载; W 为上段桩的桩身自重; γ_1 为自平衡转换系数, 规范 JGJ/T 403—2017《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》中针对转换系数的取值给出了建议, 对于长桩或黏土、粉土层取 0.8~1.0, 对于短桩或砂土层取 0.6~0.8, 对于岩层取 1。但在实际工程中, 土层分布复杂, 转换系数的取值受土体参数、施工方法、桩长细比等多种因素的影响, 单纯根据土体类型或其他现场条件进行人工判断往往不准确, 难以准确计算出自平衡试验结果。

在将自平衡试桩结果向等效受压桩转换时, 应符合下述假定:

(1) 等效受压桩也分为上、下两段桩, 分界面即为自平衡荷载箱位置所处界面。

(2) 等效受压桩分界面以下桩段的位移量与自平衡试桩法下段桩位移量相同。

根据式 1 和式 2, 对图 5 中直桩的自平衡试桩结果进行等效转换, 并与堆载试桩结果进行对比, 采用等位移法和等荷载法, 进一步确定桩土模型条件和参数下的转换系数 γ_1 的取值, 对比结果如图 6 所示。

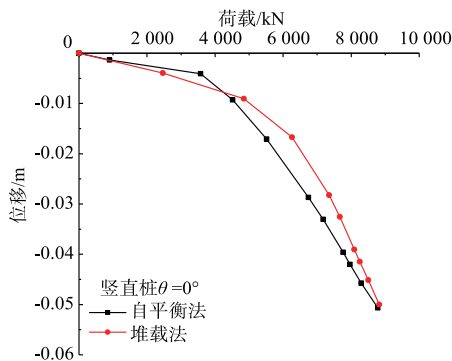


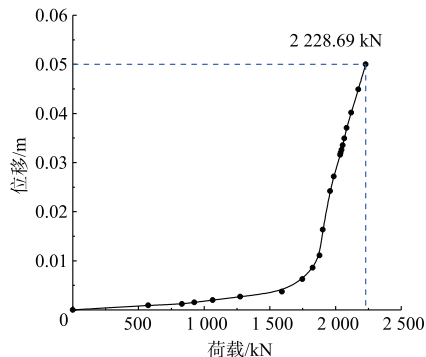
图6 竖直桩堆载法试桩和自平衡试桩等效转换结果对比

Fig.6 Comparison between static surcharge test and O-cell test (after conversion) of vertical pile

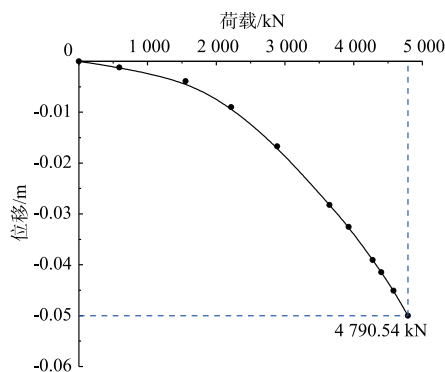
由于传统堆载试验和自平衡试验的摩阻和端阻比例不一致, 负摩阻力的传递方式也不一致, 导致转换曲线和堆载曲线的发展形态有一定的差异, 但当接近桩的极限荷载时自平衡等效转换值和堆载法结果一致, 通过计算近似得到自平衡转换系数 $\gamma_1 = 0.7$ 。

2.3 自平衡法斜桩承载力检测分析

由图 7 可知, 对于上段桩, 当桩顶荷载达到 1 800 kN 时, 曲线产生陡变, 但随着位移的增大, 桩顶荷载仍在继续增加。结合下段桩荷载 $Q-s$ 曲线的发展规律, 桩顶位移达到极限时, 等效转换计算得到上段桩极限承载力 $Q_u = 2\,228.69$ kN, 下段桩极限承载力 $Q_d = 4\,790.54$ kN。

(a) 上段桩 $Q-s$ 曲线

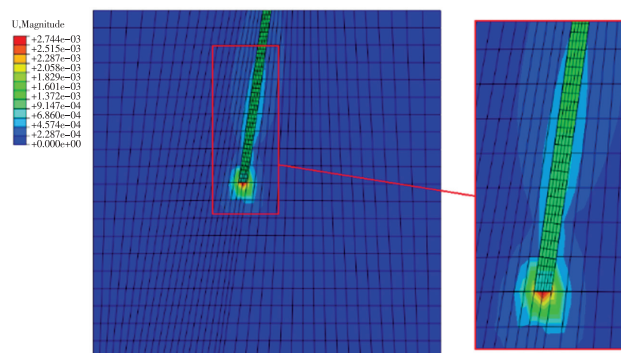
岩土力学

(b) 下段桩 $Q-s$ 曲线图7 自平衡法检测斜桩模型的 $Q-s$ 曲线, $\theta=8^\circ$ Fig. 7 $Q-s$ curve of inclined pile model, O-cell test, $\theta=8^\circ$

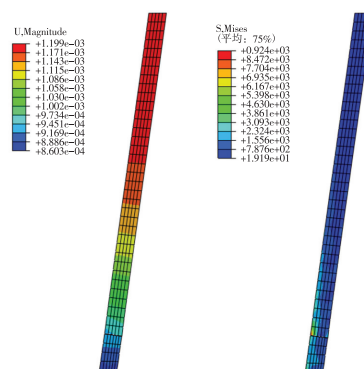
由图8可知,与堆载过程不同,自平衡试桩加载位置在荷载箱处,桩周土体不会随着荷载量的增加产生大范围的沉降,桩侧土体只在沿桩身方向的小范围内产生变形,土体变形的主要发生在桩端和桩侧附近的小范围内。图8(b)、(c)分别为斜桩变形云图和米塞斯应力云图,可见桩体只沿桩身轴向产生位移,没有发生弯曲变形,桩身应力分布均匀,除了在荷载箱附近的小范围内,几乎没有应力集中的现象,说明对于斜桩来说,自平衡法所检测得到的承载力完全由桩自身提供,而堆载法检测得到的承载力则由桩身和桩下覆土体共同承担,这就会造成桩顶达到极限位移后,桩的承载力仍稳定增加,但是其实桩身已经破坏的情况出现,而自平衡法完全沿桩身施加荷载,所得的极限承载力即桩顶达到极限位移时的受荷,并不会对桩的实际承载力造成误判。

通过与图4(a)对比发现,自平衡试桩的位移等值线范围远小于堆载试桩,桩身与土体之间不会产生脱空现象。相对于堆载法,采用自平衡法检测桩基将大大减小对桩周土体的扰动,所以自平衡试桩并不会像堆载法一样导致桩基的破坏,以及在试桩结束后产生的不可逆的桩土沉降变形,而是仅仅在荷载箱处产生一定量的位移,针对自平衡法试桩完成后荷载箱位置处的加强处理方法,如灌浆处理等可以很好得对试桩进行补强,并继续作为工程桩基使用。

将斜桩自平衡法竖向等效荷载-位移曲线和堆载法进行对比如图9所示,自平衡法和堆载法试桩得到



(a) 桩土地基沉降云图



(b) 桩体变形云图

(c) 桩体 Mises 应力云图

图8 自平衡法试桩条件下,斜桩倾角 $\theta=8^\circ$ 的桩土地基沉降及桩体 Mises 应力云图,变形缩放系数=1 000Fig. 8 Foundation deformation in conditions with $\theta=8^\circ$ and Mises stress of pile ($Q=600$ kN, O-cell test), deformation scale factor = 1 000

的斜桩竖向极限承载力分别为 7 622.91 kN 和 6 553.31 kN,相对堆载法,自平衡法结果增长了 16.32%,可见相较自平衡法,堆载法检测斜桩竖向承载力难以充分发挥桩的实际承载力。

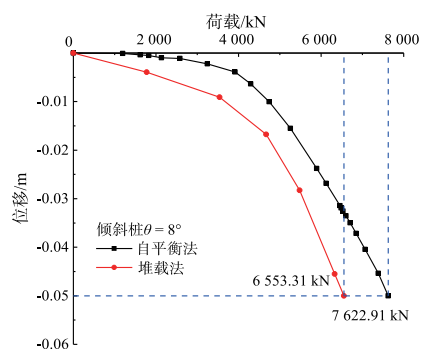


图9 自平衡法和堆载法检测斜桩竖向承载力的对比

Fig. 9 Comparison of result of O-cell test and static load test for vertical bearing capacity of inclined pile

3 结论

通过建立数值仿真模型,对自平衡法和堆载法试桩的承载机理进行了对比分析,讨论了竖向荷载下自平衡法在斜桩试桩过程的荷载传递规律,结论如下:

(1) 相同地层及荷载条件下的同一桩体模型,随着桩模型倾角增大,竖向承载力将减小,竖直桩身具有最大的竖向承载力。

(2) 对于斜桩模型,采用堆载法试桩,桩土地基将产生不均匀沉降,桩在桩顶处将产生弯曲,随着荷载等级增大,桩土之间甚至将产生脱空现象,采用自平衡法试桩则可避免上述情况的产生,自平衡试桩过程中桩体受力均匀,桩周土体不会产生大范围的沉降变形,试桩完成后的试验桩仍可作为工程桩继续使用。

(3) 对于倾角 $\theta = 8^\circ$ 斜桩模型,采用自平衡法计算得到的极限承载力为 7 622.91 kN,而堆载法计算结果为 6 553.31 kN,自平衡法的结果相对增大了 16.32%,针对斜桩试桩,采用堆载法难以充分发挥桩深层处承载能力,在桩顶达到极限位移时桩身往往并未破坏,从而错误判断桩的极限状态。自平衡法试桩的加载过程沿桩身轴向,避免了桩身倾斜的影响,可以充分发挥整桩侧摩阻力和端阻力。

参 考 文 献

- [1] 程建荣,谢素美,曹艳,等. 中国海上风电发展现状及对策建议研究 [J]. 科技导报, 2025, 43 (3): 115-128.
- [2] BASACK S, GOSWAMI G, DAI Z, et al. Failure-mechanism and design techniques of offshore wind turbine pile foundation: review and research directions [J]. Sustainability, 2022, 14 (19): 12666.
- [3] 何奔,宋孟夏,魏茂兴,等. 海上风电较大直径单桩基础波浪荷载特性研究 [J]. 太阳能学报, 2024, 45 (12): 324-330.
- [4] 徐江,龚维明,张琦,等. 大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (8): 2434-2440, 2447.
- [5] 张祖涛,陈春. 单桩加斜桩海上风机基础特点与施工技术 [J]. 建筑技术, 2023, 54 (4): 411-413.
- [6] 王淦,刘永超,张建新,等. 深厚软土地区倾斜桩组合支护基坑稳定性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20 (2): 556-565+576.
- [7] WANG Y, ORENSE R. Consideration of batter angle in pseudo-static analyses of pile foundations [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 147: 104767.
- [8] BHARATHI M, DUBEY R, SHUKLA S. Numerical simulation of the dynamic response of batter piles and pile groups [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20 (7): 3239-3263.
- [9] WANG Z, QIU W. Characteristics of wave forces on pile group foundations for sea-crossing bridges [J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109299.
- [10] ASHOUR M, ALAAELDIN A, ARAB M. Laterally loaded battered piles in sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146 (1): 06019017.
- [11] GOIT C, SAITOH M, IGARASHI T, et al. Inclined single piles under vertical loadings in cohesionless soil [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (4): 1231-1245.
- [12] LIU K, HAN C, XU C, et al. Experimental study on deformation and load transfer mechanisms of symmetrical batter piles under vertical loading [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (7): 3169.
- [13] 胡利文,姜学谦,周密,等. 海上风电钢管桩自平衡法现场试验研究 [J]. 海洋工程, 2023, 41 (1): 141-151.
- [14] XU N, HUO S. A New measurement system of large-scale steel pipe pile test for offshore wind farm [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 103 (sp1): 351-354.
- [15] CHOI Y, LEE M, NAM M, et al. Development and implementation of a high-pressure, double-acting, bi-directional loading cell for drilled shafts [J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, 39 (2): 196-205.
- [16] 王瀚萱,李忠伟,戴国亮. 基于可靠度理论的嵌岩桩自平衡转化系数研究 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (6): 2542-2548.
- [17] 王卿,陈光,刘勇,等. 洞庭湖区高速公路中小跨径桥梁 PHC 管桩标准化设计及试验研究 [J]. 公路, 2024, 69 (4): 139-146.