



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403881

引用格式:宋福星,李大勇,张雨坤,等.新型陆地风电空心锥形基础组合承载特性[J].科学技术与工程,2025,25(10):4300-4308.

Song Fuxing, Li Dayong, Zhang Yukun, et al. Bearing behavior of cone-shaped hollow foundation under combined loads[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4300-4308.

新型陆地风电空心锥形基础组合承载特性

宋福星¹, 李大勇^{1*}, 张雨坤², 梁昊¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 青岛 266580; 2. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 青岛 266590)

摘要 空心锥形基础是一种新型陆地风电基础形式,相比于传统重力式基础,具有钢筋和混凝土用量低、减少基坑开挖产生废渣土等优点。为研究空心锥形基础在组合荷载下的承载特性,通过开展数值模拟,探究基础体积一定时,基础顶板直径与底板直径比对基础组合承载能力和破坏模式的影响。结果表明:当顶板与底板直径比为6时,空心锥形基础竖向极限承载力较同体积重力式圆形基础提高1倍,弯矩极限承载力提高60%。不同组合荷载下,不同直径比的空心锥形基础的破坏包络线可分别用一条曲线描述,提出不同组合荷载的破坏包络线表达式。水平与弯矩组合荷载下,重力式圆形基础和空心锥形基础的破坏包络线呈现明显的非对称性,偏心方向相反。圆形基础在水平与弯矩荷载异向时承载力较高,空心锥形基础在水平和弯矩同向时承载力较高。空心锥形基础有较好组合承载能力,可为超大单机装机容量风机提供保障。

关键词 空心锥形基础; 组合加载; 破坏包络线; 数值模拟; 承载力

中图分类号 TU476+.9; 文献标志码 A

Bearing Behavior of Cone-Shaped Hollow Foundation under Combined Loads

SONG Fu-xing¹, LI Da-yong^{1*}, ZHANG Yu-kun², LIANG Hao¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science of Technology, Qingdao 266590, China)

[Abstract] Cone-shaped hollow foundation is a new form of onshore wind power foundation, which has the advantages of low steel and concrete consumption and reduced waste soil generation during excavation of the foundation pit, compared with the traditional gravity foundation. In order to investigate the bearing characteristics of a cone-shaped hollow foundation under combined loads, a numerical simulation was carried out to investigate the influence of the ratio of the diameter of the top plate to the diameter of the bottom plate on the combined bearing capacity and damage mode of the foundation when the volume of the foundation is held constant. The results demonstrate that when the ratio of the diameter of the top plate to the diameter of the base plate is 6, the vertical ultimate bearing capacity of the cone-shaped hollow foundation is 100% higher than that of the same volume gravity circular foundation, and the moment ultimate bearing capacity is 60% higher. The failure envelopes of different diameter ratios of the cone-shaped hollow foundation can be described by a curve under different combination loads, and the expressions of the failure envelopes of different combination loads are proposed. The failure envelopes of gravity circular and cone-shaped hollow foundations under combined horizontal and bending moment loads show obvious asymmetry, with opposite directions of eccentricity. When the horizontal and bending moment loads are in different directions, the circular foundation has higher bearing capacity. When the horizontal and bending moment are in the same direction, the cone-shaped hollow foundation has higher bearing capacity. The cone-shaped hollow foundation shows a better combination of load-bearing capacity, which can be provided for the super-large single installed capacity wind turbine.

[Keywords] cone-shaped hollow foundation; combined loads; failure envelope; numerical simulation; bearing capacity

中国陆地风电装机总量已达到407 GW,占全球装机总量43%,位居全球首位^[1]。随着陆地风电单

机装机容量的增大,叶片尺寸逐渐增加,风荷载经叶片和塔架传递至下部基础,故增大装机容量对基

收稿日期:2024-05-25; 修订日期:2025-01-15

基金项目:山东省自然科学基金青年基金(ZR2022QE029)

第一作者:宋福星(1999—),男,汉族,山东青岛人,硕士研究生。研究方向:风电基础设计。E-mail:Z22060083@s.upc.edu.cn。

*通信作者:李大勇(1971—),男,汉族,山东泰安人,博士,教授。研究方向:土力学与地基基础。E-mail:ldy@sdust.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

础的承载能力提出更高的要求。风机基础服役期间,除承受自重荷载,还受到水平及弯矩荷载作用。因此,风电基础的设计需考虑组合荷载的作用。评价基础组合荷载承载力的一种重要方法是地基破坏包络线法。破坏包络线是不同荷载组合下,基础达到极限承载力的边界,当组合荷载位于包络线内部时,基础即处于承载力安全范围,反之,发生失稳破坏。研究人员针对风电基础的破坏包络线开展大量研究。Govoni 等^[2]通过离心机模型试验,探讨了中密砂土中基础埋深对破坏包络线的影响,研究表明基础承载力随埋深的增加而增加,且水平承载力较弯矩承载力增加更为明显。Alimoradi 等^[3]利用有限元分析了吸力基础破坏包络线的影响因素,结果表明垂直拉力对基础的破坏包络面影响显著。Sakellariadis 等^[4]对群桩的三维破坏包络线进行了有限元分析,提出了一种简化的组合荷载下群桩极限状态的设计方法。张雨坤等^[5]通过三维有限元分析,研究了裙式吸力基础的组合承载力,得到了裙式吸力基础的破坏包络面表达式。Shao 等^[6]研究了海上刚性桩的组合承载力,分析表明土体抗剪强度对破坏包络线影响显著。Suryasentana 等^[7]通过详细的数值分析,研究了各种地基破坏包络线的加载方法在数值方法中的精度和计算效率,研究表明不同加载方法的破坏包络线结果基本一致。刘润等^[8]对 3 MW 风机基础进行研究,提出了宽浅式筒形基础的破坏线方程,用于指导基础设计。李思琦等^[9]研究了吸力基础在非共面组合荷载下的承载特性,提出了其破坏包络面方程,根据设计荷载与破坏包络线的位置关系,分析了某工程中吸力基础的安全性。由此可见,研究基础的破坏包络线对工程应用具有重要的指导价值。

陆地风电场多选址于偏远地区,交通不便提高了风电的建设费用。此外,基坑开挖后,废渣土的堆放会造成严重的环境污染。基于上述工程问题,李大勇^[10]设计并开发了适用于山区的空心锥形基础。空心锥形基础形似倒置的锥体,其侧壁设有柔性橡胶层,可防止风电塔架因瞬时风荷载发生刚性断裂;建造过程中,将废渣土回填至基础内部空腔,不仅降低了混凝土的生产、运输成本,亦解决了山区废渣土的安置问题^[11]。张玉等^[12]通过模型试验研究了粗砂中空心锥形基础水平单承载特性,研究发现:基础的水平承载力与底板直径呈正相关,而随加载高度增加不断降低,基于土压力分布规律,提出了空心锥形基础脱空面积的计算方法。进一步研究发现,与传统圆形基础相比,空心锥形

基础具有更高的水平承载力,且径高比和底板尺寸是影响极限承载力的主要因素^[13]。Li 等^[14]基于极限平衡法,提出了估算空心锥形基础侧向承载力的计算公式。李大勇等^[15]通过数值模拟分析了空心锥形基础在地震作用下的承载性能,与圆形基础相比,空心锥形基础显示出更好的抗震性能。梁昊等^[16]通过进行循环加载模型试验,研究了空心锥形基础在水平循环荷载作用下的累积位移、转角和水平刚度的变化规律,提出了等幅值累积转角的计算公式,为预测循环荷载下基础的转动提供了理论依据。

作为一种新型陆地风电基础,空心锥形基础的组合承载特性尚需进一步研究。现针对相同体积的空心锥形基础开展组合加载数值模拟,探究顶板(D_1)与底板直径(D_2)比对基础组合承载能力和破坏模式的影响。在此基础上,建立竖向和水平组合荷载($V-H$)、竖向和弯矩组合荷载($V-M$)及水平与弯矩组合荷载($H-M$)的破坏包络线,提出相关计算方程。

1 数值模拟

1.1 有限元模型

采用有限元软件 Plaxis 3D 开展空心锥形基础组合加载数值模拟。图 1 为空心锥形基础示意图,空心锥形基础参照一山区 3 MW 风电机的重力式圆形基础等比例换算,体积为 500 m^3 。为了探究基础尺寸对组合承载特性的影响,设计了不同顶板与底板直径的空心锥形基础,基础高度 h 均为 2.5 m , $D_1/D_2 = 1, 2, 3, 4, 5$ 和 6 。以 $D_1/D_2 = 4$ 的基础为例,顶板与底板直径分别 24 m 和 6 m 。基础采用混凝土材料模拟,重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E = 32.5 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.2$ 。

采用 Mohr-Coulomb 模型模拟中密砂土地基,砂土重度 $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,黏聚力 $c = 0.1 \text{ kPa}$,剪胀角 $\psi = 5^\circ$,弹性模量 $E = 35 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。基础与地基土采用库伦摩擦接触,混凝土与土体界面的摩擦系数 $f = 0.7$ 。

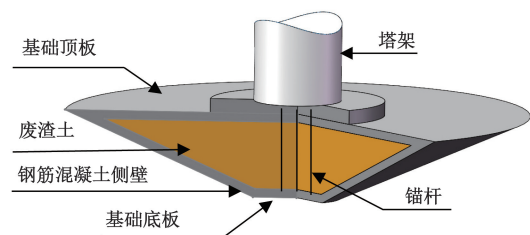


图 1 空心锥形基础示意图

Fig. 1 Sketch of cone-shaped hollow foundation

为了消除边界效应对计算结果的影响,地基模型的长度和宽度均超过 $4D_1$, 高度超 $2.5D_1$ ^[17]。为了使计算结果精确,将基础周围 $1.25D_1$ 范围内土体进行网格加密。此外,模型顶部设置为自由约束,侧面约束水平运动,底部采用固定约束,有限元计算模型如图 2 所示^[18]。基础底部嵌入土中,受到土层的支撑,这种支撑可以限制基础底部的位移,固定约束可以模拟基础底部的嵌固效应。基础侧面会受到复杂的土体应力状态影响,通过径向约束可以简化模型,同时保留土体对桩身的主要影响。顶面作为自由面,允许桩顶在水平方向上发生位移。通过上述边界条件的设置,可以更真实地模拟基础在实际环境中的受力和变形行为。

如图 3 所示,将有限元结果与 Li 等^[11] 的模型试验结果进行验证,采用 Li 等^[11] 的方法对弯矩进行无量纲化,弯矩-转角曲线变化趋势基本相同,弯矩极限承载力通过切线相交法获得,定义两条切线交点对应荷载为极限承载力。极限承载力误差在 2.5% 以内,计算结果可靠。

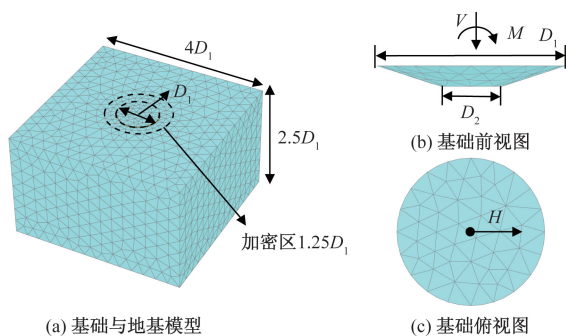


图 2 有限元模型
 D_1 和 D_2 为基础顶板和底板直径; H 、 V 、 M 分别为水平、竖向和弯矩加载方向;向下的竖向位移为正,向右的水平位移为正,顺时针旋转角度为正

图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

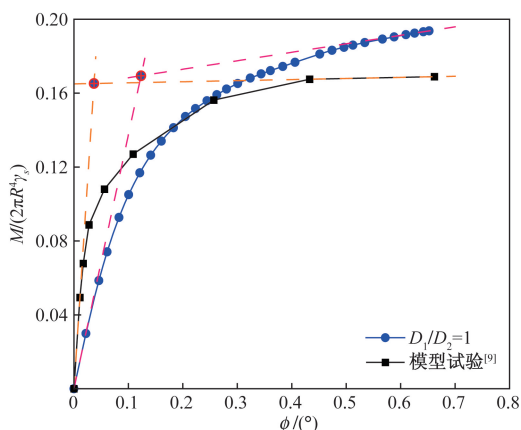


图 3 有限元模型验证

Fig. 3 Finite element model validation

1.2 组合荷载加载方法

采用 Swipe 加载方法^[7]与 Probe 型加载方法^[7]获得地基破坏包络线。如图 4 所示,Swipe 加载过程:①首先在基础上沿 i 方向施加位移并达到极限状态;②然后再沿 j 方向施加位移,达到极限状态。probe 型加载方法:控制施加在基础上不同方向的位移比值,在指定加载路径上确定失效包络线上的一点,然后通过若干次的不同加载路径获得相应的点来获得失效包络线。

在砂土地基中,仅通过一条 Swipe 加载路径,不能获得完整的破坏包络线,本文研究采用 Swipe 和 Probe 法结合的方法获得破坏包络线,如图 4 所示,先通过 Swipe 法获得部分破坏包络线,再利用 Probe 法补全破坏包络线^[19]。本文研究使用的荷载符号约定遵循 Butterfield 等^[20] 的建议,且设正向水平位移方向为基础前侧。

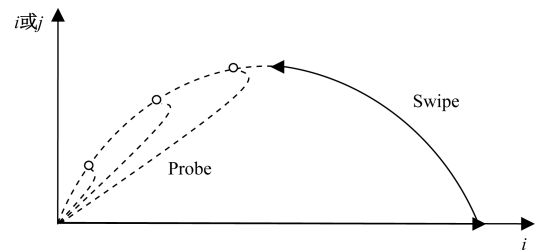


图 4 加载方法

Fig. 4 Loading method

2 单向极限承载力研究

在基础顶板中心施加位移或转角,获得基础在单调加载下的荷载-位移曲线。如图 5 所示,水平极限承载力采用与 2.1 节中弯矩极限承载力相同方法,竖向极限承载力取位移达到 $0.1D_1$ 对应荷载值^[21]。对荷载进行无量纲化处理,水平极限承载力 H_0 ($V=0, M=0$)、竖向极限承载力 V_0 ($H=0, M=0$) 与弯矩极限承载力 M_0 ($H=0, V=0$) 的无量纲化分别为: $H_0/\gamma_s W$ 、 $V_0/\gamma_s W$ 和 $M_0/\gamma_s hW$, 并分析极限承载力随基础尺寸的变化趋势,其中 h 为基础高度, W 为基础体积。

2.1 竖向极限承载力

空心锥形基础的竖向极限承载力与基础尺寸关系如图 6 所示。研究发现:竖向极限承载力随 D_1/D_2 增加而增加,且随着 D_1/D_2 增加,增长速率逐渐减小。由图 7 可知,当 $D_1/D_2=1$ (圆形基础) 时,被动土压力沿底板反向作用于基础,而随着 D_1/D_2 增加,土压力逐渐向侧壁转移, D_1/D_2 为 4、6 时,被动土压力沿垂向作用于侧壁。与等体积圆形基础

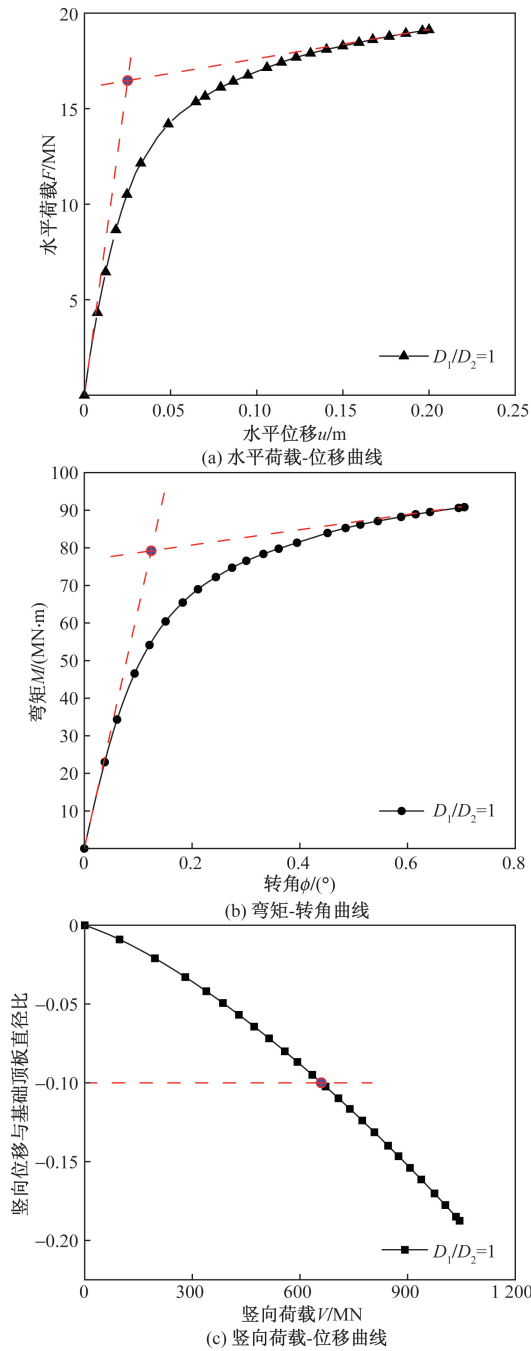


图5 荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curve

相比,空心锥形基础侧壁与土体的接触面积增大,且随着 D_1/D_2 的增大,侧壁与土体的接触面积进一步增加,进而调动更多土体参与抵抗竖向荷载。因此,空心锥形基础具有更好的竖向承载特性。

将数值模拟结果进行拟合,得到空心锥形基础竖向承载力 $V_0/\gamma_s W$ 与 D_1/D_2 的关系为

$$\frac{V_0}{\gamma_s W} = 0.6 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 - 10.2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 + 68.1 \frac{D_1}{D_2} + 14.6 \quad (1)$$

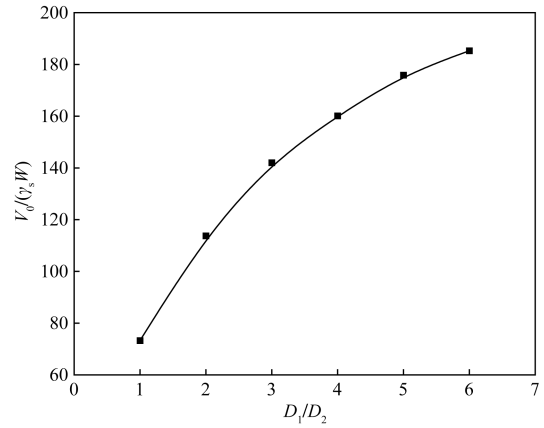


图6 竖向极限承载力与基础尺寸的关系
Fig. 6 Relationship between the ultimate vertical bearing capacity and foundation dimension

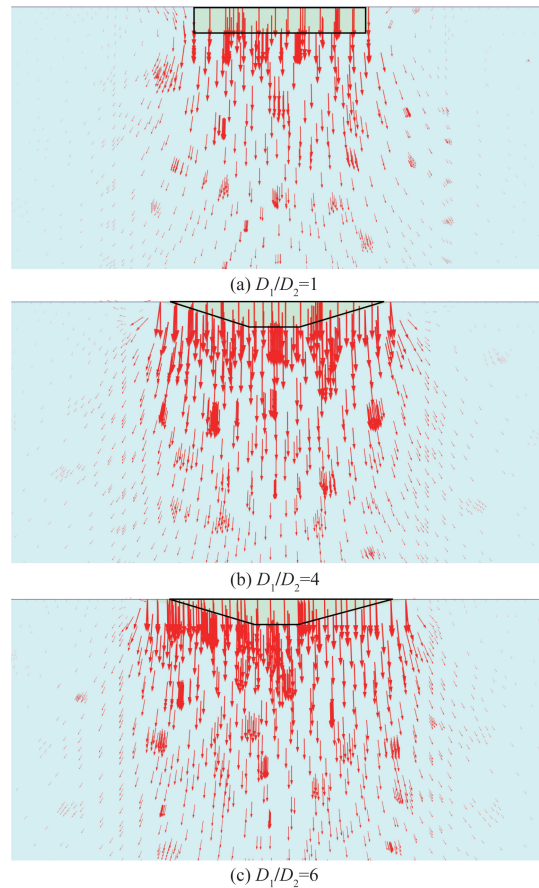


图7 竖向荷载下土体位移矢量图
Fig. 7 Displacement vectors of soil under vertical loading

2.2 水平极限承载力

如图8所示,空心锥形基础水平极限承载力与 D_1/D_2 减小而减小,即水平承载力随着 D_1/D_2 增大逐渐减小,并在 D_1/D_2 超过4后趋于稳定。由图9可知,当 $D_1/D_2=1$ (圆形基础) 时,水平荷载作用下,基础沿底板发生滑移剪切破坏,主要由板-土界面摩擦提供抗力,而 D_1/D_2 为4或6时,空心锥形基础绕侧

壁及底板转动失稳,破坏模式改变导致水平承载力变化。

将无量纲化水平承载力 $H_0/\gamma_s W$ 与 D_1/D_2 拟合,关系公式为

$$\frac{H_0}{\gamma_s W} = -0.014 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 + 0.2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 - 0.98 \frac{D_1}{D_2} + 2.62 \quad (2)$$

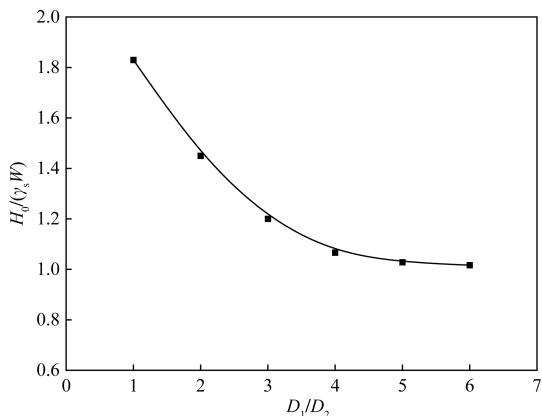


图8 水平极限承载力与基础直径比的关系

Fig. 8 Relationship between the ultimate horizontal bearing capacity and foundation dimension

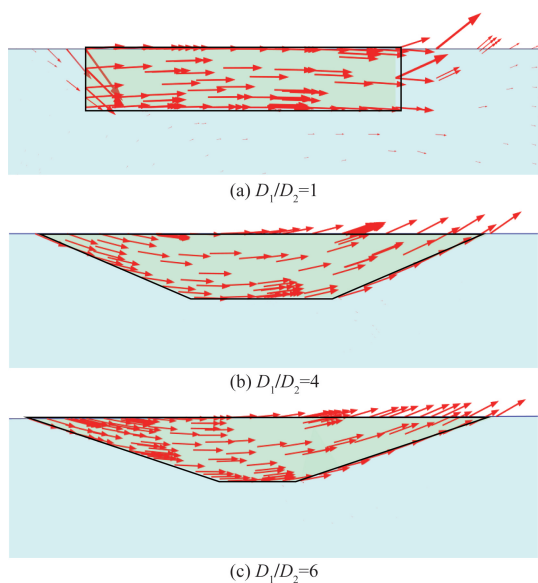


图9 水平荷载下土体位移矢量图

Fig. 9 Displacement vectors of soil under horizontal loading

2.3 弯矩极限承载力

图10为抗弯极限承载力和基础顶板与底板直径比关系曲线,结果表明:随着 D_1/D_2 增加,弯矩承载力逐渐增大。由图11中土体位移矢量发现:弯矩荷载作用下,圆形和空心锥形基础均沿加载方向转动失稳破坏,锥形基础的旋转中心控制于顶板,且向加载方向偏移,圆形基础的旋转中心控制

在底板,因此,圆形基础受弯更易于发生倾覆失稳破坏。

将无量纲化弯矩承载力 $M_0/\gamma_s h W$ 与 D_1/D_2 拟合,关系公式为

$$\frac{M_0}{\gamma_s h W} = 0.015 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 - 0.25 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 + 1.57 \frac{D_1}{D_2} + 2.16 \quad (3)$$

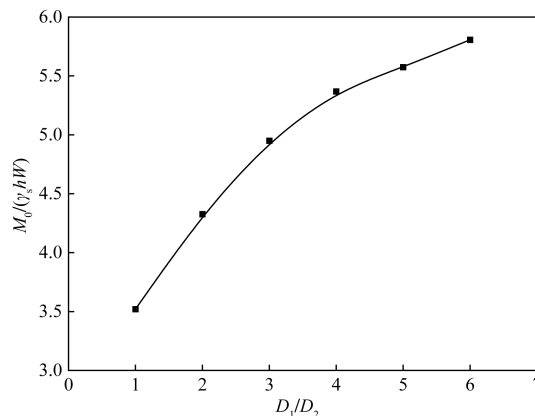


图10 极限抗弯承载力与基础直径比的关系

Fig. 10 Relationship between the ultimate moment bearing capacity and foundation dimension

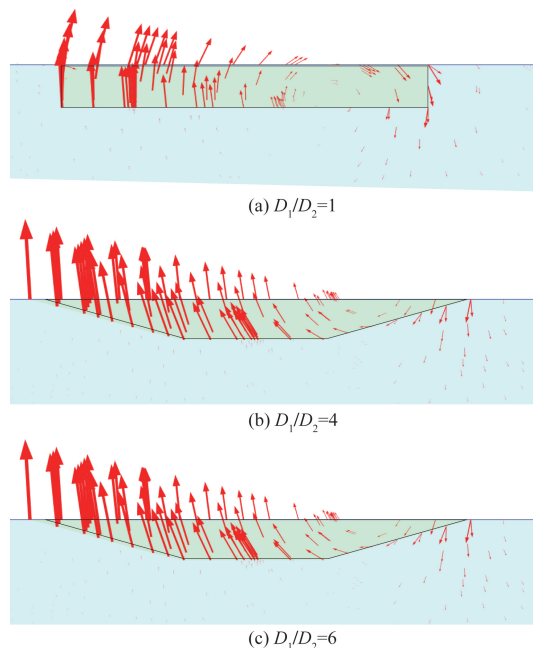


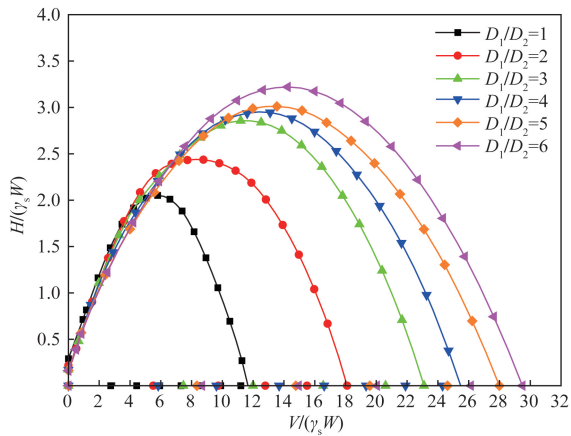
图11 弯矩荷载下土体位移矢量图

Fig. 11 Displacement vectors of soil under moment loading

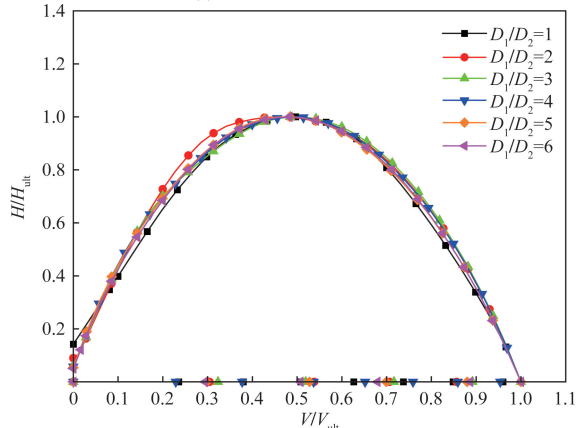
3 二维组合荷载下地基破坏包络线

3.1 V-H 破坏包络线

图12(a)为空心锥形基础的无量纲化 V-H 破坏包络线,研究发现, V-H 荷载平面内,随着 D_1/D_2 增大,无量纲化 V-H 破坏包络线的面积逐渐增大,由



(a) 无量纲化V-H破坏包络线



(b) 归一化V-H破坏包络线

图 12 V-H 地基破坏包络线

Fig. 12 Failure envelopes in V-H load planes

此可见,当空心锥形基础的体积 W 一定时,减小侧壁锥角可有效提高基础的水平与竖向组合荷载承载能力。

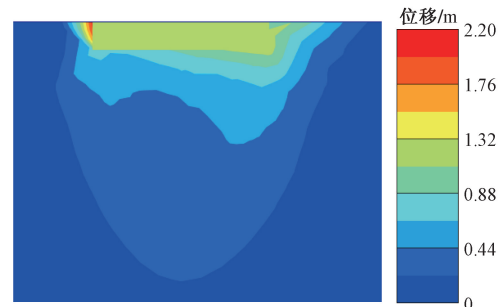
进一步将 V-H 破坏包络线进行归一化处理,即 H/H_{ult} 和 V/V_{ult} ,由图 12 (b) 可以看出,对于不同 D_1/D_2 的空心锥形基础,无量纲化 V-H 破坏包络线基本重合。圆形基础与空心锥形基础的最大水平荷载 H_{ult} 出现在 $V/V_{ult} = 0.5$ 处。对于图 12 (b) 中的破坏包络线,表达方程为

$$\frac{H}{H_{ult}} = -3.8 \left(\frac{V}{V_{ult}}\right)^2 + 3.7 \frac{V}{V_{ult}} + 0.09 \quad (4)$$

图 13 为在 V-H 加载模式下的土体位移云图,研究发现:圆形基础前侧出现明显的变形,而空心锥形基础的塑性变形区均匀分布于基础前、后两侧,由此说明:水平与竖向荷载耦合作用下,空心锥形基础调动更多的后侧土体抵抗外部荷载。此外,相比于水平单调加载,随着竖向荷载增加,应力逐渐扩散至砂土地基内部,基础由界面滑移剪切破坏转变为匀型破坏。

3.2 V-M 破坏包络线

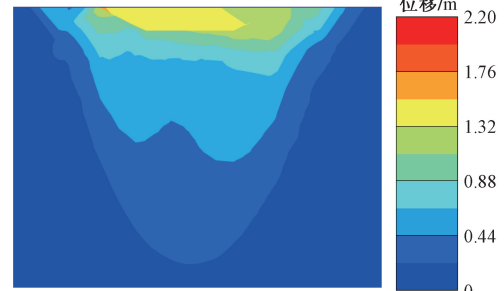
空心锥形基础的无量纲化 V-M 破坏包络线如



(a) $D_1/D_2=1$



(b) $D_1/D_2=5$



(c) $D_1/D_2=6$

图 13 V-H 加载模式下土体位移云图

Fig. 13 Displacement contour of ground in V-H load planes

图 14 (a) 所示。V-M 荷载平面内,随着竖向荷载 V 逐渐增加,空心锥形基础的弯矩 M 先增大后减小。当 D_1/D_2 由 1 增加至 5 时,V-M 破坏包络线面积扩大近 3 倍,由此说明:实际工程中,通过增加空心锥形基础的侧壁倾角可改善其承载特性。

采用 V_{ult} 与 M_{ult} 对竖向荷载 V 和弯矩 M 进行归一化处理,如图 14 (b) 所示。研究发现:归一化处理,不同 D_1/D_2 的空心锥形基础收敛于同一曲线,当 $V/V_{ult} = 0.5$ 时,空心锥形基础抗弯承载力达到峰值,随着 V/V_{ult} 继续增大,归一化弯矩 M/M_{ult} 逐渐减小。

图 15 为 V-M 荷载作用下圆形和空心锥形基础的位移云图。竖向与弯矩荷载作用下,圆形基础转动中心向基础后侧偏移,而空心锥形基础转动中心位于中轴线附近,由此说明:圆形基础受荷更易于倾覆失稳。顶板与底板直径比为 2 ~ 6 时,V-M 与 V-H 平面的地基破坏包络轨迹有同样的变化趋势,即不同 D_1/D_2 的破坏包络线基本重合。其 V-M 破坏包络线经归一化处理,公式为

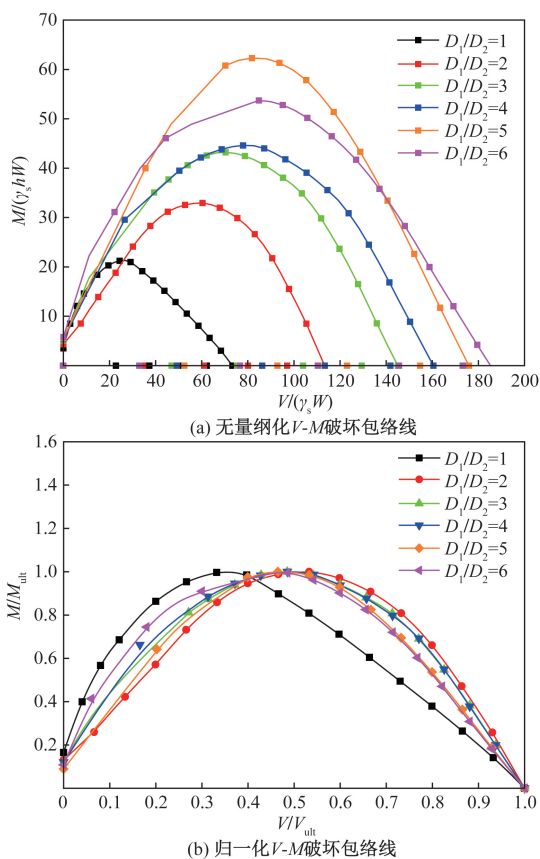


图 14 V-M 地基破坏包络线

Fig. 14 Failure envelopes in V-M load planes

$$\frac{M}{M_{ult}} = -3.75 \left(\frac{V}{V_{ult}}\right)^2 + 3.61 \frac{V}{V_{ult}} + 0.12 \quad (5)$$

3.3 H-M 破坏包络线

采用固定位移比的 Probe 加载方法确定 H-M 破坏包络线。如图 16(a) 所示, H-M 破坏包络线呈现明显非对称性, 对于圆形基础, 包络线向左侧偏心, 表明弯矩 M 与水平荷载 H 异向可获得较高的承载力; 而空心锥形基础 H-M 破坏包络线向右侧偏心, 表明弯矩 M 和水平荷载 H 同向可达到较高的承载力。

图 16(b) 为归一化 H-M 破坏包络线, 对于不同 D₁/D₂ 的空心锥形基础, 归一化 H-M 包络线亦收敛为一条外凸的曲线, 其拟合关系为式 (6)。如图 17 所示, 拟合公式与数值计算结果较为吻合。

$$1.45 \left(\frac{H}{H_{ult}}\right)^2 - 1.78 \frac{H}{H_{ult}} \frac{M}{M_{ult}} + 1.45 \left(\frac{M}{M_{ult}}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

如图 18 所示, 对于圆形基础, 当水平荷载 H 与弯矩 M 同向时, 基础前侧产生较大的土体变形, 而二者异向时, 土体塑性变形集中于后侧底板处。不同于圆形基础, 同向水平与弯矩荷载作用下, 空心锥形基础前侧的顶板边缘发生较大土体变形, 应变

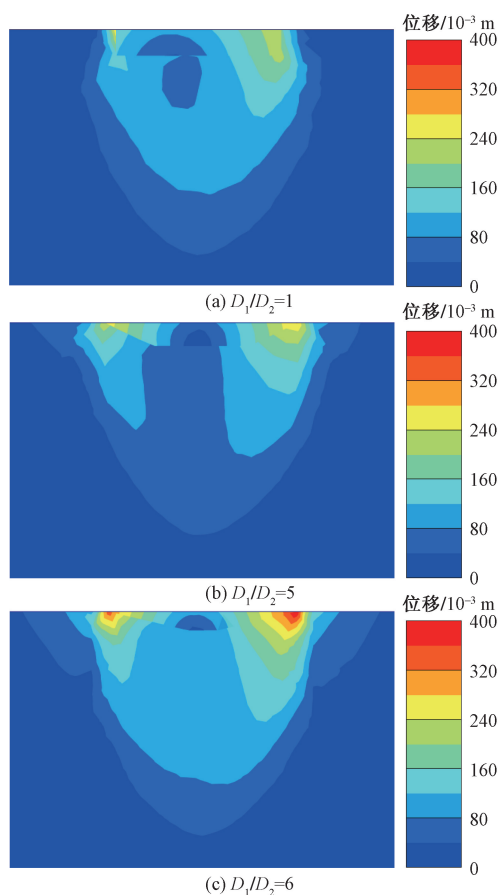


图 15 V-M 加载模式下土体位移云图

Fig. 15 Displacement contour of ground in V-M load planes

随基础转动扩散至地基内部, 而异向水平与弯矩荷载作用下, 土体变形集中于基础前侧顶板边缘和后侧趾部。

4 结论

针对等体积空心锥形基础开展组合加载数值模拟, 探究顶板与底板直径比 D₁/D₂ 对基础承载力和破坏模式的影响, 并获得了 V-H、V-M 和 H-M 破坏包络线以及包络线表达式, 得出如下结论。

(1) 较重力式圆形基础, 相同体积的空心锥形基础的 D₁/D₂ 为 6 时, 竖向极限承载力提高 1 倍, 弯矩极限承载力提高 60%。当基础体积一定时, 减小侧壁倾角可以提高基础的竖向承载力及抗倾覆能力。

(2) V-H 破坏包络线的面积随 D₁/D₂ 增大而增大, 因此, 当空心锥形基础的体积一定时, 减小侧壁锥角能提高基础的 V-H 组合承载能力, 当 D₁/D₂ 为 2~5 时, V-M 破坏包络线面积表现出相同趋势。H-M 破坏包络线呈现非对称性, 圆形基础在弯矩与水平荷载异向时承载力较高; 而空心锥形基础在 M 和 H 同向时承载力较高。

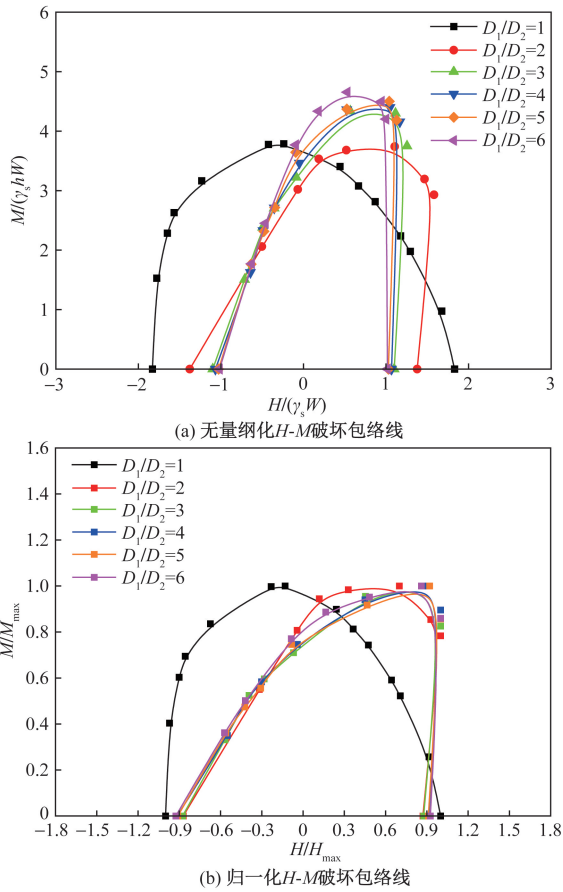


图 16 H-M 地基破坏包络线
Fig. 16 Failure envelopes in H-M load planes

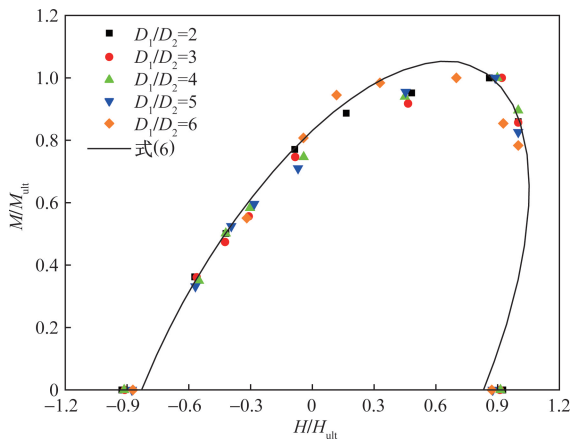


图 17 H-M 地基破坏包络线方程
Fig. 17 Equation of failure envelope in H-M load planes

(3)基础受复合加载时破坏模式与单向加载时不同。较单向水平加载,受竖向和水平组合荷载时,基础由滑移剪切破坏转变为勺型破坏。竖向与弯矩荷载作用下,基础转动中心向基础后侧偏移。

参 考 文 献

[1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024[EB/OL]. (2024-05-14) [2024-05-17]. <https://gwec.net/wpcontent/up->

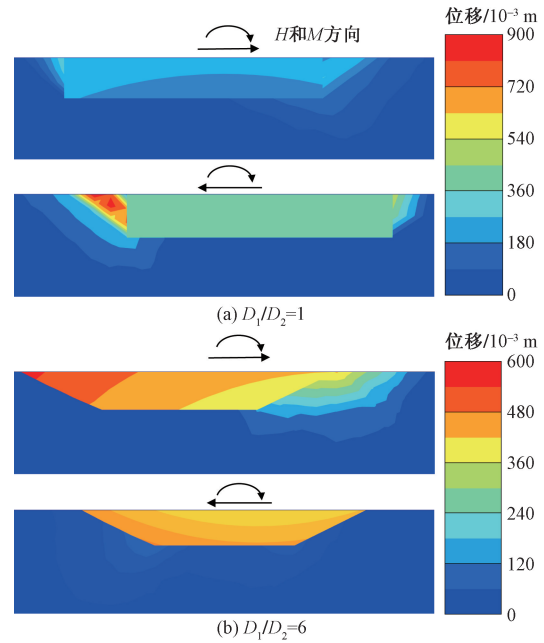


图 18 H-M 加载模式下土体位移云图
Fig. 18 Displacement contour of ground in H-M load planes

loads/2024/04/GWR-2024_digital-version_final-1. pdf.
[2] Govoni L, Gourvenec S, Gottardi G. Centrifuge modelling of circular shallow foundations on sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2010, 10(2): 35-46.
[3] Alimoradi H, Noorzad A, Ebrahimiyan B. Explicit FE analysis of 3D failure envelopes of suction caisson foundations supporting offshore wind turbines in sand subjected to combined loading[J]. Ocean Engineering, 2024. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.116831.
[4] Sakellariadis L, Anastasopoulos I. Analytical 3D failure envelopes for RC pile groups under combined loading: a generalised design approach [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108570.
[5] 张雨坤,王冲冲,李大勇,等. 砂土中裙式吸力基础复合承载特性数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1515-1521. Zhang Yukun, Wang Chongchong, Li Dayong, et al. Numerical simulation of bearing characteristics of modified suction caissons in sand under combined loads[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(4): 1515-1521.
[6] Shao X, Jiang C, Fu Y, et al. Failure envelope for offshore rigid piles under combined horizontal-moment loading in clay with linearly increasing undrained shear strength [J]. Ocean Engineering, 2024, 307. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118168.
[7] Suryasentana S K, Dunne H P, Martin C M, et al. Assessment of numerical procedures for determining shallow foundation failure envelopes[J]. Géotechnique, 2020, 70(1): 60-70.
[8] 刘润,王磊,丁红岩,等. 复合加载模式下不排水饱和软黏土中宽浅式筒型基础地基承载力包络线研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 146-154. Liu Run, Wang Lie, Ding Hongyan, et al. Failure envelopes of large-diameter shallow buried bucket foundation in undrained saturated soft clay under combined loading conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 146-154.
[9] 李思琦,王媛,李庆文,等. 非共面 V-H-M 复合加载模式上海

- 上风电桶形基础破坏包络面特性研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 391-399.
- Li Siqi, Wang Yuan, Li Qingwen, et al. Failure envelopes of bucket foundations for offshore wind turbines under combined non-planar V-H-M loading[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(6): 391-399.
- [10] 李大勇. 钢筋混凝土空心锥体山区风电柔性基础及其施工方法; 201410654756. 8[P]. 2015-12-09.
- Li Dayong. Reinforced concrete hollow cone mountain wind power flexible foundation and construction method thereof; 201410654756. 8[P]. 2015-12-09.
- [11] Li D Y, Li S S, Zhang Y K. Cone-shaped hollow flexible reinforced concrete foundation(CHFRF)-innovative for mountain wind turbines[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(5): 1172-1181.
- [12] 张玉, 李大勇, 梁昊, 等. 风电空心锥形基础水平承载特性及土压力分布规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1404-1412.
- Zhang Yu, Li Dayong, Liang Hao, et al. Model tests on horizontal bearing capacity and earth pressure distribution of hollow cone-shaped foundation under horizontal monotonic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1404-1412.
- [13] 李大勇, 房兆晓, 张雨坤, 等. 砂土中陆地风电空心锥形基础水平承载力的影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7032-7039.
- Li Dayong, Fang Zhaoxiao, Zhang Yukun, et al. Influence factors of horizontal bearing capacity of hollow cone-shaped foundation for onshore wind turbine in sand[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 7032-7039.
- [14] Li S S, Zhang Y K, Li D Y, et al. Lateral bearing capacity of cone-shaped hollow foundation by using limit equilibrium method [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2022, 22(3): 157-168.
- [15] 李大勇, 胡靖彦, 张雨坤. 陆地风电空心锥形基础地震响应特性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 57-68.
- Li Dayong, Hu Jingyan, Zhang Yukun. Responses of cone-shaped hollow reinforced concrete foundation for onshore wind turbines to seismic loading[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2023, 42(1): 57-68.
- [16] 梁昊, 吴宇旗, 李大勇. 陆地风电空心锥形基础水平循环承载特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 306-314.
- Liang Hao, Wu Yuqi, Li Dayong. Lateral bearing behaviors of hollow cone-shaped foundation for onshore wind farms[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 306-314.
- [17] 李大勇, 胡靖彦, 张雨坤. 等质量圆形基础与风电空心锥形基础承载特性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10887-10895.
- Li Dayong, Hu Jingyan, Zhang Yukun. Bearing behavior of cone-shaped hollow reinforced concrete foundation(CHRF) and the circular foundation for wind turbines under same reinforced concrete usage[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10887-10895.
- [18] 郭健, 王皓, 骆光杰, 等. 海上风机变径单桩基础水平承载特性数值分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3658-3664.
- Guo Jian, Wang Hao, Luo Guangjie, et al. Numerical analysis of horizontal bearing capacity of variable diameter pile foundation for offshore wind turbine[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3658-3664.
- [19] 范庆来, 郑静, 武科. 砂土地上圆形浅基础三维破坏包络面的理论研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(3): 63-69.
- Fan Qinglai, Zheng Jing, Wu Ke. Theoretical analysis on three dimensional failure envelope of circular footings on sand[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(3): 63-69.
- [20] Butterfield R, Houlsby G T, Gottardi G. Standardized sign conventions and notation for generally loaded foundations [J]. Géotechnique, 1997, 47(5): 1051-1054.
- [21] Deb T K, Singh B. Vertical bearing behavior of monopod caisson foundation in sandy soils[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2021, 147(4). DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000634.