

DOI:10.11784/tdxbz202503036

海上新型重力式锚固基础承载性能研究

邱长林, 李晨正, 刘 润

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 重力式锚固基础作为海上漂浮式系统的重要锚固型式, 因其良好的地质适应性在工程实践中广泛应用, 但其水平与抗扭转承载性能不佳制约了在海上漂浮式光伏中的应用. 针对传统重力式锚固基础在海上漂浮式光伏中的承载效率低的问题, 现通过在传统正方形重力式锚固基础的四周增加翼板的方式来提高其承载性能. 本文提出 3 种翼板增强型重力式锚固基础结构(A 类、B 类和 C 类), 通过数值模拟计算, 对比研究了不排水饱和黏土中新型重力式锚固基础在水平荷载 H 和扭转荷载 T 作用下的承载性能. 研究表明: 相较于传统正方形重力式锚固基础, 翼板结构可显著改善重力式锚固基础承载特性. 当翼板尺寸 b 增加时, 带翼板的重力式锚固基础水平极限承载力 H_{ult} 和抗扭转极限承载力 T_{ult} 相对正方形重力式锚固基础呈指数型增长. 在 $H-T$ 复合加载工况下, 3 种新型重力式锚固基础在不同埋深比工况下的承载力破坏包络线均大于传统正方形重力式锚固基础. 保持用钢量不变, 对于采用长方形翼板的重力式锚固基础, 当短边方向与锚身连接时, 其构造方式在水平承载力、抗扭转承载力和 $H-T$ 复合加载条件下均呈现更优的力学性能表现. 该研究结果能够为海上漂浮式光伏所使用的重力式锚固基础的选型和优化设计提供依据.

关键词: 重力式锚固基础; 饱和黏土; 水平和扭转; 极限承载力; 破坏包络线

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)12-1263-09

Research on Bearing Performance of Newly Developed Gravity-Anchored Foundations in Marine Environment

Qiu Changlin, Li Chenzheng, Liu Run

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Gravity-anchored foundations represent a significant anchorage type for offshore floating photovoltaic systems, and they have been employed extensively in engineering practice owing to their favourable geological adaptability. However, their suboptimal performance in terms of horizontal and torsional load-bearing capacities limits their utilisation in offshore floating photovoltaic applications. In consideration of the suboptimal bearing efficiency exhibited by the conventional gravity-anchored foundation in the context of offshore floating photovoltaic systems, a methodology was devised to enhance the bearing performance. This methodology involved the augmentation of the wing-plates surrounding the conventional square gravity-anchored foundation, thereby optimizing its functionality. In this paper, three types of wing-plate reinforced gravity-anchored foundation structures (types A, B and C) were proposed, and the bearing performance of the newly developed gravity-anchored foundations in undrained saturated clay under horizontal load H and torsional load T was investigated comparatively through numerical simulations. The findings demonstrate that the wing-plate configuration significantly enhances the load-bearing capabilities of gravity-anchored foundations in comparison with conventional square gravity-anchored foundations. The horizontal ultimate bearing capacity (H_{ult}) and torsional ultimate bearing capacity (T_{ult}) of a gravity-anchored foundation with wing-plates increase exponentially with respect to those of a square gravity-anchored foundation as the size of wing-plates (b) increases. Furthermore, under the $H-T$ composite loading condition, the failure envelopes of the three novel gravity-

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-05-20.

作者简介: 邱长林(1973—), 男, 博士, 副教授, qiu_cl@tju.edu.cn.

通信作者: 刘 润, liurun@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2603000).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2603000).

anchored foundations at different embedment ratios are larger than those of the square gravity-anchored foundations. By maintaining the quantity of steel constant, the construction method for gravity-anchored foundations equipped with rectangular wing-plates exhibits enhanced mechanical performance in relation to horizontal load resistance, torsional load resistance and *H-T* composite loading conditions, particularly when the short-side direction is connected to the anchor body. The findings in this paper have the potential to serve as a reference for the selection and optimal design of gravity-anchored foundations employed in the context of offshore floating photovoltaic systems.

Keywords: gravity-anchored foundation; saturated clay; horizontal and torsional; ultimate bearing capacity; failure envelope

锚固系统在海上漂浮式系统的建设中具有重要地位,其通过为上部结构提供承载力从而限制了上部浮式结构的大幅运动,保证了整体系统的安全运转^[1]. 锚固基础的主要型式包括重力式锚、桩锚、吸力锚、法向承力锚、吸力式贯入锚和动力贯入锚等^[2-4]. 重力式锚固基础是使用较早的一种锚固型式^[5],其主要依靠结构自重提供抗拔力,依靠锚与土体间的相互作用提供水平向承载力,受力简单且对不同地质条件的适用性强,在海流发电机^[6]、海洋热能发电^[7]、波浪能转换器^[8]等领域应用广泛. 然而,当重力式锚应用于海上漂浮式光伏时,由于浮体的平面尺寸达上千米^[9],在风浪流作用下会产生很大的扭力,这就对重力式锚的抗扭承载性能提出了更高的要求. 同时,海上漂浮式光伏还受到开发成本的制约. 综上所述,重力式锚是一个潜在的、相对经济性较好的锚型,需要对其进行结构优化设计.

对重力式锚的研究可追溯到 20 世纪 70 年代^[10-12],众多研究围绕矩形重力式锚有无剪力键^[13-14]或裙板展开,揭示了其在黏土、砂土和钙质土中的单向承载特性及破坏包络线:孟祥伟等^[5]基于模型试验确定了两种带有复杂剪力键的矩形重力式锚在不同黏土中的水平承载力;李飒等^[15]通过室内模型试验,研究了复合荷载作用下正方形重力式锚的抗滑稳定机理及分析方法;徐健等^[4]通过有限元分析 (finite element analysis, FEA) 方法研究了正方形重力式锚在拉拔荷载与自重组合作用下的承载机理,建立了承载力破坏包络线;徐保照^[16]进行了钙质土中重力式锚固基础研究;岳洋^[17]进行了砂土海床上打孔和裙板式重力式锚固基础的承载力研究;竺新文^[18]在室内模型试验的基础上,结合有限元软件,对重力锚在钙质土和黏性土上的水平承载过程进行了模拟;刘鹏飞^[19]通过数值模拟与模型试验相结合的方法,研究了带键锚、平底锚和八键锚的承载特性,分析了重力锚在黏土中的承载力机理,并对重力锚在黏土中水平承载力大小的影响因素进行了探讨.

以往的研究多关注剪力键对水平承载特性的影

响,并通过改变剪力键形状来提高水平承载性能. 然而,鲜见关于重力式锚的抗扭转承载特性的研究. 为了满足工程需要,本文提出带翼板的正方形重力式锚结构,并采用数值方法研究了翼板尺寸对重力式锚抗扭转和水平向承载力的影响.

1 有限元模型及新型结构

1.1 计算方法及验证

选择有理论解的正方形重力式锚进行计算方法验证. 建立的 FEA 模型半视图如图 1 所示,其中 B 和 d 分别为正方形重力式锚的边长和高度. 计算参数见表 1 和表 2.

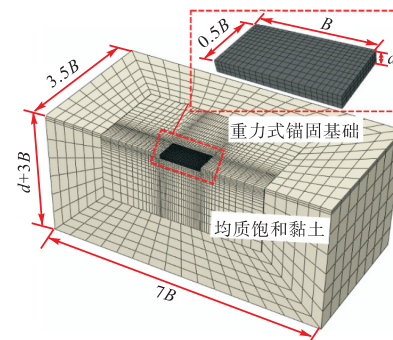


图 1 FEA 模型半视图

Fig.1 Half-view of FEA model

表 1 土体模型的计算参数

Tab.1 Calculation parameters for soil model

参数	数值
有效容重 γ' (kN/m ³)	6
不排水抗剪强度 S_u /kPa	7
弹性模量 E /Pa	1 000 S_u ^[20]
泊松比 ν	0.49

表 2 正方形重力式锚的计算参数

Tab.2 Calculation parameters for square gravity anchor

参数	数值
边长 B /m	5
钢材密度 ρ (kg/m ³)	7 850
泊松比 λ	0.30
弹性模量 E /Pa	2.1 $\times 10$ ¹¹

土体采用 Tresca 模型,正方形重力式锚为钢结

构,高度为 d 。通过调整重力锚的高度 d (即埋深 $D = d$),研究埋深比 d/B 分别为 0.050、0.075 和 0.100 时的承载特性。重力式锚底面与土体粗糙接触且不可分离,考虑了重力式锚侧面与土体之间的一种保守情况,即重力锚式侧面与土体光滑接触且可分离。

在有限元模型计算中施加水平和扭转荷载,计算得到正方形重力式锚的水平极限承载力 H_{ult} 和抗扭转极限承载力 T_{ult} ,将计算结果与塑性极限分析(plastic limit analysis, PLA)^[20-22]、文献[13]的结果进行对比,如表 3 所示。

表 3 单向极限承载力对比

Tab.3 Comparison of ultimate bearing capacity in one direction

单向极限承载力	有限元计算结果	PLA 结果	误差/%	文献[13]结果	误差/%
H_{ult}/kN	213.4	216.2 ^[20]	1.3	210.0	1.6
$T_{ult}/(kN \cdot m)$	517.8	487.0 ^[22]	6.3	—	—

由表 3 可以看出,有限元计算结果与 PLA 和文献[13]的结果误差较小,验证了本文采用的分析方法具有可靠性。

1.2 带翼板锚固基础

在正方形重力式锚的四周增加翼板可提高其承载性能,如图 2 所示。

图 2(a)为正方形翼板,翼板边长均为 b 。图 2(b)和图 2(c)为长方形翼板,分别为长边或短边与锚身连接。为研究带翼板基础的承载特性,本文设计了 4 种翼板尺寸,编号为 A1 ~ A4,如表 4 所示,并开展了水平极限承载力和抗扭转极限承载力计算。

在对极限承载力的计算结果进行无量纲化处理时,需要用到基础宽度,但带翼板的重力式锚形状不规则,给无量纲处理带来困难。为此,本文根据 API RP 2GEO^[23]中对不规则形状基础的等效方法,将其等效为矩形基础,用等效矩形基础的宽度进行无量纲处理,见表 4。API RP 2GEO^[23]中的公式为

$$A_{idealized} = B'L' = A_{real} \tag{1}$$

$$I_{x,idealized} = I_{x,real} \tag{2}$$

$$I_{y,idealized} = I_{y,real} \tag{3}$$

式中: $A_{idealized}$ 为等效矩形理想化后的面积; B' 和 L' 分别为等效矩形的宽度和长度; A_{real} 为等效前的重力式锚固基础实际面积; $I_{x,idealized}$ 和 $I_{y,idealized}$ 为等效矩形理想化后的面积惯性矩的大小,分别与等效前的重力式锚固基础的面积惯性矩的大小 $I_{x,real}$ 和 $I_{y,real}$ 相等。

通过求解式(1) ~ (3)可以确定等效矩形的宽度 B' 和长度 L' 。由于本文中只用到了等效宽度 B' ,因此等效长度 L' 便不再列出。

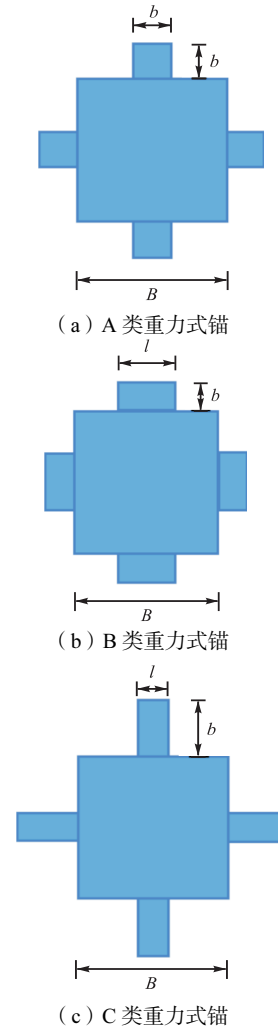


图 2 A、B 和 C 3 类带翼板的重力式锚

Fig.2 Three types of gravity anchors with wing-plates (types A, B and C)

表 4 正方形翼板尺寸、等效矩形宽度和无量纲极限承载力
Tab.4 Square wing-plate dimensions, equivalent rectangular width and dimensionless ultimate bearing capacities

编号	翼板尺寸 b/m	单个翼板面积/ m^2	等效宽度 B'/m	$H_{ult}/(AS_u)$	$T_{ult}/(AB'S_u)$
A1	0.10B	0.250 0	4.3	1.361 9	0.771 6
A2	0.20B	1.000 0	4.1	1.389 1	0.884 4
A3	0.25B	1.562 5	4.2	1.380 2	0.911 7
A4	0.30B	2.250 0	4.3	1.366 3	0.925 4

注: A 为带翼板的重力式锚固基础的实际面积。

从表 4 可以看出,当编号 A1 ~ A4 的正方形翼板尺寸 b 增大时,等效宽度 B' 呈现先减小后增大的趋势,无量纲水平极限承载力呈现先增大后减小的趋势,无量纲抗扭转极限承载力持续增大。本文兼顾水平和抗扭转承载特性,以单个翼板面积 $1.250 0 m^2$ 为基准开展研究,分别设计 B1 ~ B3 和 C1 ~ C3 共 6 种不同长宽比的翼板尺寸,由 API RP 2GEO^[23]计算等效矩形宽度 B' ,见表 5。

表 5 B类和C类重力式锚的单个翼板尺寸及等效矩形宽度
Tab.5 Individual wing-plate dimensions and equivalent rectangular width for gravity anchors of types B and C

编号	翼板尺寸 b/m	翼板尺寸 l/m	等效宽度 B'/m
B1	0.10B	2.500 0	5.0
B2	0.16B	1.562 5	4.5
B3	0.20B	1.250 0	4.3
C1	0.50B	0.500 0	3.0
C2	0.312 5B	0.800 0	3.7
C3	0.25B	1.000 0	4.0

1.3 带翼板的重力式锚固基础模型验证

为了进一步验证带翼板的重力式锚固基础有限元模型的可靠性, 现将其与有理论解和规范的正方形重力式锚固基础进行验证, 具体过程如下。

步骤 1 计算无翼板的正方形重力式锚的水平、抗扭极限承载力。

步骤 2 计算带翼板的重力式锚 A1 ~ A4、B1 ~ B3 和 C1 ~ C3 的水平、抗扭转极限承载力。

步骤 3 计算带翼板的重力式锚最外侧轮廓的新正方形锚的水平、抗扭转极限承载力。

步骤 4 对比验证。

带翼板的重力式锚最外侧轮廓的新正方形锚如图 3 所示, 其中 B_0 为新正方形重力式锚的宽度. 计算结果如图 4 ~ 6 所示。

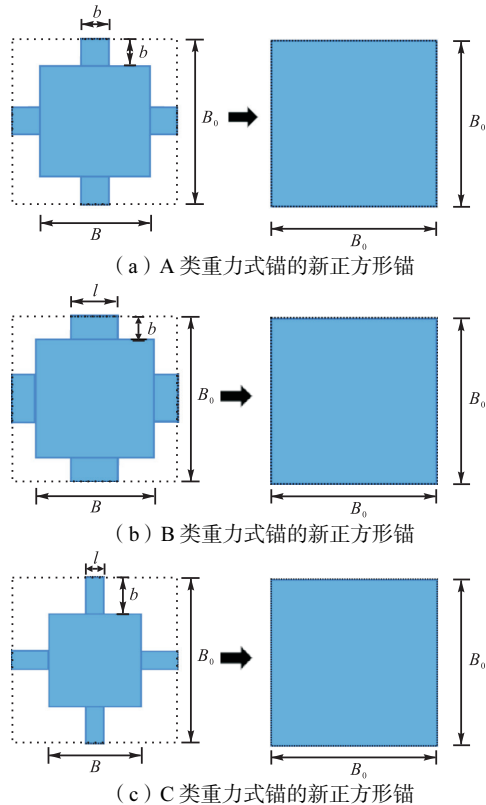


图 3 A、B 和 C 3 类带翼板的重力式锚的新正方形重力式锚
Fig.3 New square gravity anchors for three types of gravity anchors with wing-plates (types A, B and C)

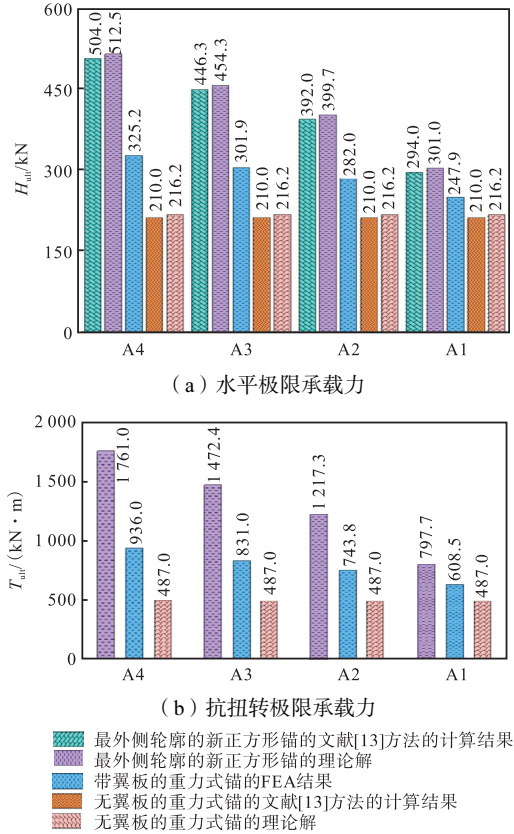


图 4 A 类带翼板的重力式锚模型验证
Fig.4 Model validation of type A gravity anchor with wing-plates

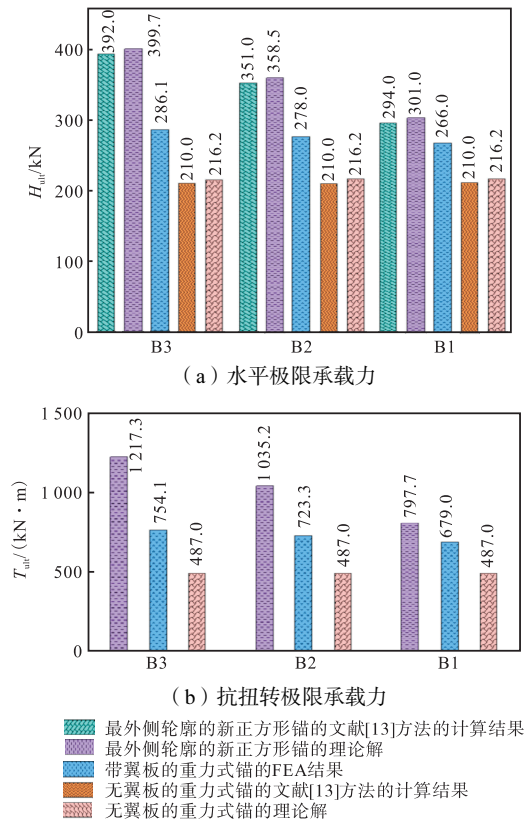


图 5 B 类带翼板的重力式锚模型验证
Fig.5 Model validation of type B gravity anchor with wing-plates

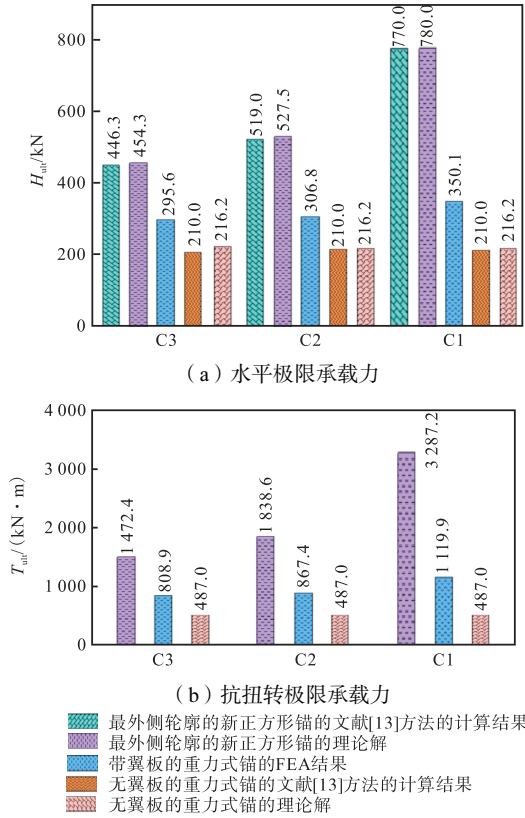


图6 C类带翼板的重力式锚模型验证

Fig.6 Model validation of type C gravity anchor with wing-plates

由图 4~6 可知,带翼板的重力式锚的数值计算结果均处于无翼板重力式锚和最外侧轮廓的新正方形锚之间,这就进一步验证了带翼板的重力式锚 FEA 模型的可靠性。

2 A类重力式锚固基础的承载特性

2.1 A类重力式锚固基础的水平承载特性

图 7 为 A 类重力式锚固基础在不同埋深比 d/B 情况下水平极限承载力与 b/B 的关系。

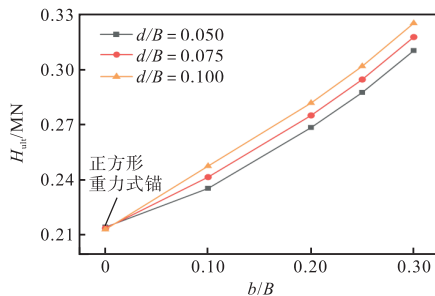


图7 A类重力式锚水平极限承载力

Fig.7 Horizontal ultimate bearing capacity of type A gravity anchor

以 $d/B = 0.100$ 为例,由图 7 可知,正方形重力式锚的水平极限承载力为 0.213 MN;当 b/B 分别为

0.10、0.20、0.25 和 0.30 时,水平极限承载力分别提高了 16.14%、32.13%、41.47% 和 52.36%。

A 类重力式锚相对于正方形重力式锚水平极限承载力提高系数 η_h 如图 8 所示。

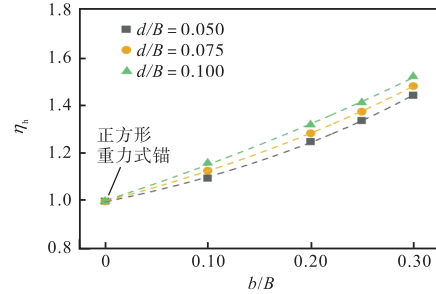


图8 A类重力式锚水平极限承载力提高系数

Fig.8 Improvement factor of horizontal ultimate bearing capacity of type A gravity anchors

提高系数 η_h 与锚的宽度 B 、高度 d 及翼板尺寸 b 有关,其拟合公式为

$$\eta_h = 0.025e^{\left(37.04\frac{d}{B} + 3.23\frac{b}{B}\right)} + 0.115e^{3.23\frac{b}{B}} + 0.723 \quad (4)$$

式中 $\eta_h = H_{ult(1)}/H_{ult(2)}$, $H_{ult(1)}$ 为带翼板的重力式锚的水平极限承载力, $H_{ult(2)}$ 为无翼板锚的水平极限承载力。图 8 中的 3 条虚线为拟合公式的预测曲线。

2.2 A类重力式锚固基础的抗扭转承载特性

图 9 为 A 类重力式锚固基础在不同埋深比 (d/B) 情况下,抗扭转极限承载力与 b/B 的关系。

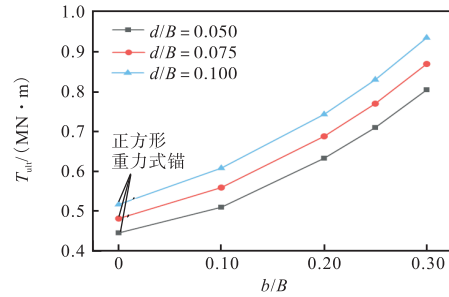


图9 A类重力式锚抗扭转极限承载力

Fig.9 Torsional ultimate bearing capacity of type A gravity anchors

以 $d/B = 0.100$ 为例,由图 9 可知,正方形重力式锚的抗扭转极限承载力为 0.518 MN·m;当 b/B 分别为 0.10、0.20、0.25 和 0.30 时,抗扭转极限承载力分别提高了 17.53%、43.66%、60.50% 和 80.78%。

A 类重力式锚相对于正方形重力式锚抗扭转极限承载力提高系数 η_t 如图 10 所示,其拟合公式为

$$\eta_t = \left(0.19 + 2.08\frac{d}{B}\right)e^{4.41\frac{b}{B}} + 0.698 \quad (5)$$

式中 $\eta_t = T_{ult(1)}/T_{ult(2)}$, $T_{ult(1)}$ 为带翼板的重力式锚的抗扭转极限承载力, $T_{ult(2)}$ 为无翼板锚的抗扭转极限承

载力. 图 10 中的 3 条虚线为拟合公式的预测曲线.

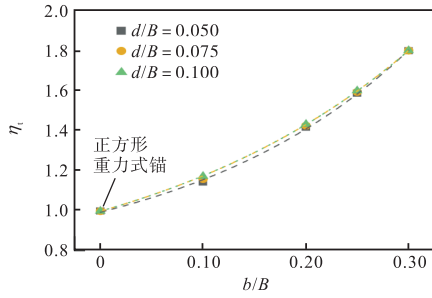


图 10 A 类重力式锚抗扭转极限承载力提高系数

Fig.10 Improvement factor for torsional ultimate bearing capacity of type A gravity anchors

2.3 A 类重力式锚固基础在 H-T 复合加载条件下的破坏包络线

采用 Swipe 加载法确定重力式锚固基础的破坏包络线. 图 11~13 所示为 H-T 复合加载条件下, 饱和黏土中重力式锚在不同埋深比时的破坏包络线. 从图 11~13 中可以看出: 在不同埋深比下的 A 类重力式锚均比正方形重力式锚的包络线面积更大; 随着正方形翼板尺寸 b 的增加, 包络线沿着 T 荷载方向向上扩张得较为明显, 说明随着 b 的增大, A 类重力式锚的抗扭承载力显著增大.

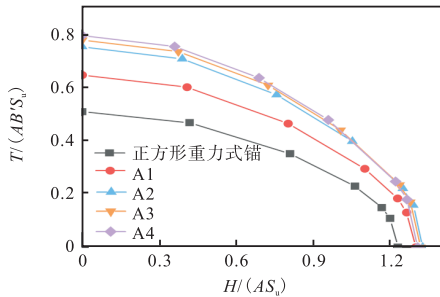


图 11 A 类重力式锚在 H-T 复合加载条件下破坏包络线 (d/B = 0.050)

Fig.11 Failure envelopes for type A gravity anchors under H-T composite loading conditions (d/B = 0.050)

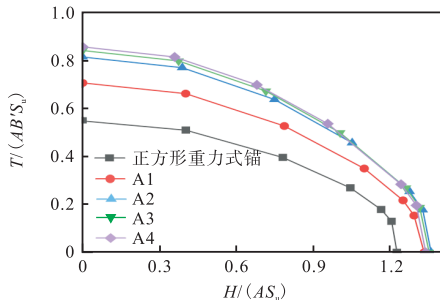


图 12 A 类重力式锚在 H-T 复合加载条件下破坏包络线 (d/B = 0.075)

Fig.12 Failure envelopes for type A gravity anchors under composite H-T loading conditions (d/B = 0.075)

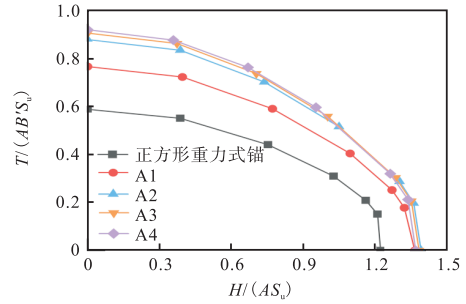


图 13 A 类重力式锚在 H-T 复合加载条件下破坏包络线 (d/B = 0.100)

Fig.13 Failure envelopes for type A gravity anchors under H-T composite loading conditions (d/B = 0.100)

3 B、C 类重力式锚固基础的承载特性

3.1 B、C 类重力式锚固基础的水平承载特性

图 14 为 B、C 类重力式锚固基础在不同埋深比 (d/B) 情况下, 水平极限承载力与 b/B 的关系, 其中 b/B 分别为 0.10、0.16 和 0.20 时对应 B 类重力式锚, b/B 分别为 0.25、0.3125 和 0.50 时对应 C 类重力式锚.

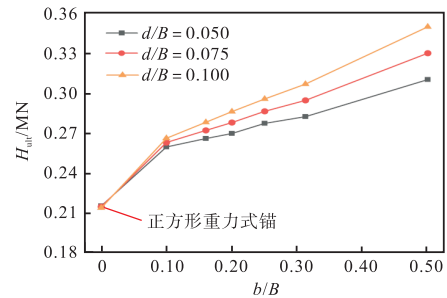


图 14 B、C 类重力式锚水平极限承载力

Fig.14 Horizontal ultimate bearing capacity of gravity anchors of types B and C

以 d/B = 0.100 为例, 由图 14 可知, 当 b/B 分别为 0.10、0.16、0.20、0.25、0.3125 和 0.50 时, 水平极限承载力分别提高了 24.64%、30.26%、34.05%、38.50%、43.77% 和 64.06%.

B、C 类重力式锚相对于正方形重力式锚水平极限承载力提高系数 η_h 如图 15 所示, 其拟合公式为

$$\eta_h = -0.82e^{\left(\frac{6.17d}{B} - 3.48\frac{b}{B}\right)} + 0.624e^{-3.48\frac{b}{B}} + 1.511 \quad (6)$$

图 15 中的 3 条虚线为拟合公式的预测曲线.

3.2 B、C 类重力式锚固基础的抗扭转承载特性

图 16 为 B、C 类重力式锚固基础在不同埋深比 (d/B) 情况下, 抗扭转极限承载力与 b/B 的关系.

以 d/B = 0.100 为例, 由图 16 可知, 当 b/B 分别为 0.10、0.16、0.20、0.25、0.3125 和 0.50 时, 抗扭极

限承载力分别提高了 31.15%、39.70%、45.64%、56.23%、67.53% 和 116.30%。

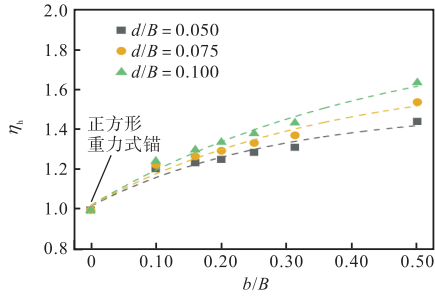


图 15 B、C 类重力式锚水平极限承载力提高系数
Fig.15 Improvement factor for horizontal ultimate bearing capacity of gravity anchors of types B and C

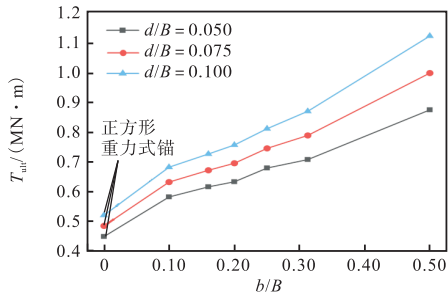


图 16 B、C 类重力式锚抗扭转极限承载力
Fig.16 Torsional ultimate bearing capacity of gravity anchors of types B and C

B、C 类重力式锚相对于正方形重力式锚抗扭转极限承载力提高系数 η_t 如图 17 所示,其拟合公式为

$$\eta_t = -16.24e^{\left(-16.39\frac{d}{B} + 0.33\frac{b}{B}\right)} + 12.13e^{0.33\left(\frac{b}{B}\right)} - 3.93 \quad (7)$$

图 17 中的 3 条虚线为拟合公式的预测曲线。

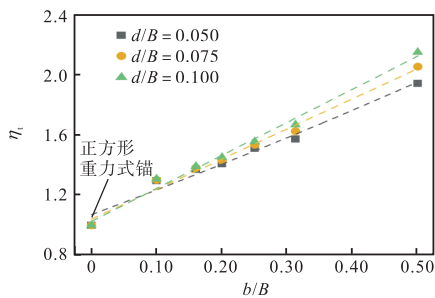


图 17 B、C 类重力式锚抗扭转极限承载力提高系数
Fig.17 Improvement factor for torsional ultimate bearing capacity of gravity anchors of types B and C

3.3 B、C 类重力式锚固基础在 H-T 复合加载条件下的破坏包络线

图 18~20 所示为 H-T 复合加载条件下,饱和黏土中重力式锚在不同埋深比时的破坏包络线。

从图 18~20 中可以看出:在不同埋深比下的 B、C 类重力式锚均比正方形重力式锚的包络线面积更

大;随着翼板尺寸 b 的增加,B、C 类重力式锚包络线逐渐向外扩张,其中 C1 重力式锚的包络线扩张尤其明显,由此可知,C1 重力式锚固基础的承载性能最为突出。

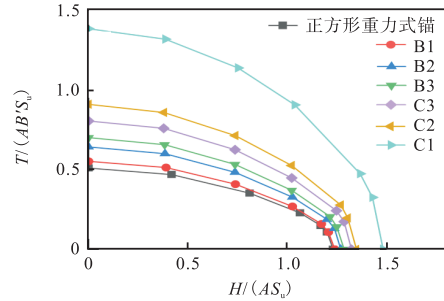


图 18 B、C 类重力式锚在 H-T 复合加载条件下破坏包络线 ($d/B = 0.050$)

Fig.18 Failure envelopes of gravity anchors of types B and C under H-T composite loading conditions ($d/B = 0.050$)

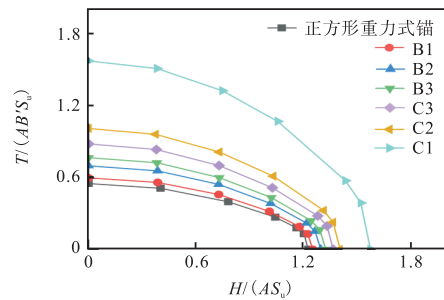


图 19 B、C 类重力式锚在 H-T 复合加载条件下破坏包络线 ($d/B = 0.075$)

Fig.19 Failure envelopes of gravity anchors of types B and C under H-T composite loading conditions ($d/B = 0.075$)

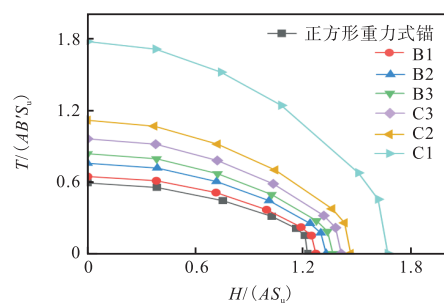


图 20 B、C 类重力式锚在 H-T 复合加载条件下破坏包络线 ($d/B = 0.100$)

Fig.20 Failure envelopes of gravity anchors of types B and C under H-T composite loading conditions ($d/B = 0.100$)

4 结 论

本文通过数值计算模拟了重力式锚固基础在海底饱和黏土中的承载力大小,并通过规范和理论公式

验证了数值模拟的可靠性. 提出了 3 种新型重力式锚, 研究了新型重力式锚的承载特性, 分析了新型重力式锚的翼板尺寸与形状对承载性能的影响. 本文的主要结论如下.

(1) 正方形重力式锚的四周增加翼板可以有效提高正方形重力式锚的抗扭转和水平承载性能.

(2) 带翼板的重力式锚承载特性均与翼板尺寸 b 有关, 随着 b 的增加, 其水平和抗扭转极限承载力相对无翼板锚呈指数型增加趋势.

(3) 当长方形翼板的重力式锚的短边与锚身连接时, 其水平和抗扭转能力更优. 在本文的计算工况中, 当用钢量相同时, C1 型重力式锚采用长、宽比为 5:1 的翼板且短边与锚身连接时, 其水平与抗扭转承载力均为最佳.

(4) $H-T$ 复合加载条件下, 带翼板的重力式锚承载性能均优于无翼板锚的对应值. 随着 b 的增大, 带正方形翼板的重力式锚的抗扭承载力显著增大; 随着 b 的增大, 长方形翼板短边与锚身连接的 C1 重力式锚的包络线扩张尤其明显, 表明 C1 重力式锚的承载性能最佳. 因此, 在 $H-T$ 复合加载且保持用钢量不变的情况下, 应采用 C1 重力式锚.

参考文献:

- [1] Rui S J, Zhou Z F, Gao Z, et al. A review on mooring lines and anchors of floating marine structures[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114547.
- [2] 国 振, 王立忠, 李玲玲. 新型深水系泊基础研究进展[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增 2): 469-477.
Guo Zhen, Wang Lizhong, Li Lingling. Recent advances in research of new deepwater anchor foundations [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Suppl 2): 469-477 (in Chinese).
- [3] 叶邦全. 海洋工程用锚类型及其发展综述[J]. *船舶与海洋工程*, 2012, 28(3): 1-7.
Ye Bangquan. Review of ocean engineering anchor type and development[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2012, 28(3): 1-7 (in Chinese).
- [4] 徐 健, 葛晓春, 祝周杰, 等. 一种复杂分层土中的重力锚斜拉承载力计算方法[J]. *海岸工程*, 2024, 43(4): 336-348.
Xu Jian, Ge Xiaochun, Zhu Zhoujie, et al. A method for calculating slant dragging bearing capacity of gravity anchor in complex layered soils[J]. *Coastal Engineering*, 2024, 43(4): 336-348 (in Chinese).
- [5] 孟祥伟, 黄博晓, 闫宏生, 等. 深海重力锚在黏土中承载性能模型试验[J]. *船舶工程*, 2021, 43(6): 154-161.
Meng Xiangwei, Huang Boxiao, Yan Hongsheng, et al. Model test on bearing capacity of deep sea gravity anchor in clay soil[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(6): 154-161 (in Chinese).
- [6] VanZwieten Jr J H, Seibert M G, von Ellenrieder K. Anchor selection study for ocean current turbines[J]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2014, 13(1): 59-73.
- [7] Taylor R, True D, Arnold F. Anchoring and mooring considerations for an OTEC pilot plant[C]//OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. Seattle, USA: IEEE, 2010.
- [8] Harris R E, Johanning L, Wolfram J. Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices[C]//MAREC 2004. Blyth, UK: Institute of Marine Engineering, Science & Technology, 2004.
- [9] 王 霄, 王树青, 宋宪仓, 等. 海上漂浮式光伏平台研究进展与关键技术[J/OL]. *工程科学与技术*. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202400217858>, 2025-01-06.
Wang Xiao, Wang Shuqing, Song Xiancang, et al. A review of research progress and key issues of offshore floating photovoltaic platforms[J/OL]. *Advanced Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.2024-00217858>, 2025-01-06 (in Chinese).
- [10] Lauritzen R, Schjetne K. Stability calculations for offshore gravity structures[C]//Offshore Technology Conference. Houston, USA: Society of Petroleum Engineers, 1976.
- [11] Valent P J, Taylor R J, Atturio J M, et al. Single anchor holding capacities for ocean thermal energy conversion (OTEC) in typical deep sea sediments[J]. *Ocean Engineering*, 1979, 6(1/2): 169-245.
- [12] Taylor R J. Interactions of Anchors with Soil and Anchor Design[R]. California, USA: Naval Civil Engineering Lab, 1982.
- [13] Bartholomew C A. US Navy Salvage Engineer's Handbook[M]. USA: US Navy, 1992.
- [14] 闫宏生, 刘鹏飞, 孟祥伟, 等. 深水重力锚黏土质水平承载机理研究及数值模拟[J]. *中国造船*, 2021, 62(3): 222-230.
Yan Hongsheng, Liu Pengfei, Meng Xiangwei, et al. Horizontal bearing mechanism and numerical simulation of deep-water gravity anchor in clay[J]. *Shipbuilding of*

- China, 2021, 62(3): 222-230(in Chinese).
- [15] 李 飒, 段高松, 李怀亮, 等. 复合荷载作用下重力锚的抗滑稳定计算[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 40-45.
- Li Sa, Duan Gaosong, Li Huailiang, et al. Anti-sliding stability calculation of gravity anchor subjected to combined loading[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2018, 40(2): 40-45(in Chinese).
- [16] 徐保照. 钙质土中锚固基础设计研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2014.
- Xu Baozhao. The Design and Study of Anchor Foundation in Calcium Soil[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2014(in Chinese).
- [17] 岳 洋. 砂土海床上复合重力式锚固基础的承载力研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2022.
- Yue Yang. Research on the Bearing Capacity of Composite Gravity Foundation on Sand[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2022(in Chinese).
- [18] 竺新文. 重力锚室内模型试验及数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2017.
- Zhu Xinwen. The Indoor Model Test and Numerical Simulation Research of Gravity Anchor[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2017(in Chinese).
- [19] 刘鹏飞. 黏土中重力锚承载特性研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2021.
- Liu Pengfei. Research on Bearing Characteristics of Gravity Anchor in Clay[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2021(in Chinese).
- [20] Feng X, Randolph M F, Gourvenec S. An analytical solution for the undrained horizontal-torsional resistance of mudmats[J]. Géotechnique, 2017, 67(4): 325-337.
- [21] Murff J D, Aubeny C P, Yang M. The effect of torsion on the sliding resistance of rectangular foundations[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG). Perth, Australia: Center for Offshore Foundation Systems, 2010.
- [22] Nouri H, Biscontin G, Aubeny C P. Undrained sliding resistance of shallow foundations subject to torsion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(8): 04014042.
- [23] API RP 2GEO Geotechnical and Foundation Design Considerations[S]. Washington DC: American Petroleum Institute, 2011.

(责任编辑:武立有)