

文章编号:1008-1542(2016)03-0283-05

doi:10.7535/hbkd.2016yx03011

组合荷载作用下平板锚承载能力的数值预测

张春会, 郑晓明, 田英辉, 张海霞, 王丹丹

(河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为预测组合荷载作用下平板锚的承载力,假设锚-土之间不脱离,在 ABAQUS 下建立了法向力、切向力和弯矩共同作用的平板锚运动变形数值模型。与极限理论解对比,证明了上述数值模型的正确,并利用其计算了法向力、切向力和弯矩组合荷载作用下板锚的极限承载力,利用 Murff 模型拟合了组合荷载作用下板锚的极限承载力包络面。结果表明, Murff 模型能较好地拟合组合荷载作用下板锚的极限承载力包络面。

关键词:地基基础工程;组合荷载;ABAQUS;平板锚;承载力;Murff 模型

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

Numerical prediction of the bearing capacity of plate anchors subjected to combined loads

ZHANG Chunhui, ZHENG Xiaoming, TIAN Yinghui, ZHANG Haixia, WANG Dandan

(School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: To predict the bearing capacity of plate anchors subjected to combined loads, based on the assumption that there is no separation between the plate and soil, the numerical model of the motion and transformation of the plate anchor subjected to combined loads including the normal force, tangential force and bending moment loads in ABAQUS software is set up. The numerical model is proved by comparing the calculated bearing capacity with that of analytical solution. The numerical model is used to calculate the ultimate bearing capacity of the plate anchor subjected to the combined loads including the normal force, the tangential force and bending moment. The results show that murff model is used to preferably fit the ultimate bearing capacity envelope of plate anchors subjected to combined loads.

Keywords: ground foundation engineering; combined loads; ABAQUS; plate anchor; bearing capacity; Murff model

深水油气资源开采是保障中国能源安全的关键。在深水油气田开发中,浮式平台已取代传统的导管架和重力式平台,成为主要的油气采集设施。使用深水锚泊系统将浮式平台安全可靠地系泊在海底是深水油气资源开发的关键技术。深水锚泊系统包括锚固基础和锚缆。板锚是一种重要的锚固基础形式,它完全深埋入海床中,提供的总抗拉力由 3 部分组成^[1-3]:净抗拉力(土体有效抗剪强度形成的抗拔力),吸力和锚的自重。相比于其他类型的锚固基础,板锚具有重量轻、承载能力高、操作简单、成本低廉、可回收利用等优势。

收稿日期:2015-12-07;修回日期:2016-01-10;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51274079, 51574139);河北省自然科学基金(E2015208089)

作者简介:张春会(1976—),男,辽宁阜新人,教授,博士,主要从事岩土工程方面的研究。

E-mail: zhangchunhui789@126.com

张春会, 郑晓明, 田英辉, 等. 组合荷载作用下平板锚承载能力的数值预测[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(3): 283-287.

ZHANG Chunhui, ZHENG Xiaoming, TIAN Yinghui, et al. Numerical prediction of the bearing capacity of plate anchors subjected to combined loads[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 283-287.

例如,巴西 Voador 项目采用的板锚,相比于能提供相同承载力的吸力沉箱,自重减轻 85%,安装时间缩短 2/3,工程耗资减少 50%^[4]。

深水板锚主要有 3 种型式:传统的固定锚脛的拖曳嵌入锚(drag embedment anchor,简称 DEA)、可调整锚脛的法向承力锚(vertically loaded anchor,简称 VLA),以及吸力贯入式板锚(suction embedded plate anchor,简称 SEPLA)。这 3 种板锚安装方法不同,但工作机理一致。在深水环境下,板锚通常遭受风、浪、流的作用,工作环境复杂,因此如何预测板锚在复杂组合荷载作用下的极限承载力是板锚工程中的关键课题。O'NEILL 等^[5]利用离心机模拟了板锚-土的相互作用。GAUDIN 等^[6]利用离心机模拟了不同安装方法对 SEPLA 造成的影响。LIU 等^[7]开发了一套室内试验装置,研究了拖曳板锚安装中的 5 个关键问题。DAHLBERG 等^[8]、HEYERDAHL 等^[9]分别针对商用锚板与自主设计的平板锚开展了海岸场地测试和拖曳-抗拔-回收整体连贯实验研究。MERIFIELD 等^[10-11]利用极限分析法给出了二维及三维板锚的下限解。王立忠等^[12]给出了深埋条形和圆形锚板承载力上限解。黄茂松等^[13]基于块体集推导出了砂土板锚承载力的上限解。于龙等^[14-15]、刘君等^[16]、王栋等^[17]使用有限元方法分析了深埋黏土板锚的承载力,但模拟中板锚仅承受单一竖向拉力作用。刘君等^[18]使用颗粒流法分析了砂土地基中板锚的承载力。TIAN 等^[19-20]提出了板锚-土相互作用的大变形有限元方法,分析了带翼板的 SEPLA 的 keying 过程。这些已有研究主要集中在板锚在单一荷载如法向力、切向力作用下的极限承载力。实际上,海洋环境复杂,与板锚相连的锚链施力方向不断变化,板锚的运动特性也随之不断改变,板锚通常遭受法向力、切向力和弯矩的共同作用,如何预测组合荷载作用下板锚的极限承载能力对于板锚工程设计和理解板锚的工作机理都具有重要意义。

本文在 ABAQUS 下建立了组合荷载作用下板锚-土相互作用的数值模型,模拟计算了法向力、切向力和弯矩共同作用下板锚的极限承载能力,结合 Murff 模型给出了组合荷载作用下板锚极限承载力预测方法。

1 数值模拟

1.1 数值模型

结合中国南海海域工程地质情况,概化一数值算例进行研究。

海床为饱和黏土,荷载作用下饱和黏土近似不排水,土的不排水剪切强度 $s_u = 10 \text{ kPa}$,泊松比为 0.49。土体的弹性模量取为 $500s_u$ 。已有研究表明^[5],土的重度对板锚极限承载力影响不大,因此本文不考虑土重度的影响。本文取平面应变问题进行分析,锚为平板条状,宽度 $B = 3.5 \text{ m}$,厚度 $d = 0.5 \text{ m}$,宽厚比为 7。与土相比,锚的刚度很大,视作刚体。平板锚在锚链作用下拖动时,板锚底面与上面之间分别存在负、正孔压,形成“吸力”,使得平板锚底面与土体之间不脱离,因此平板锚与土的接触视为不脱离。

为避免边界的影响,海底土的计算尺寸为水平方向 $9B$,竖直方向 $8B + d$,板锚埋置于土体中央,埋置深度为 $4B$ 。靠近板锚的有限元网格加密,远离板锚有限元网格稀疏,左、右及下边界固定约束,上边界自由,在 ABAQUS 下建立的数值模型如图 1 所示。

荷载施加于板锚中心。具体计算过程如下:

1) 先计算单一荷载作用下板锚的承载力。分别施加法向力、切向力和弯矩荷载,不断增大荷载直至锚周围土达到极限状态,利用 ABAQUS 中的内嵌命令获得极限荷载,即为极限承载力。

2) 计算 2 种组合荷载作用下的承载力。以法向力

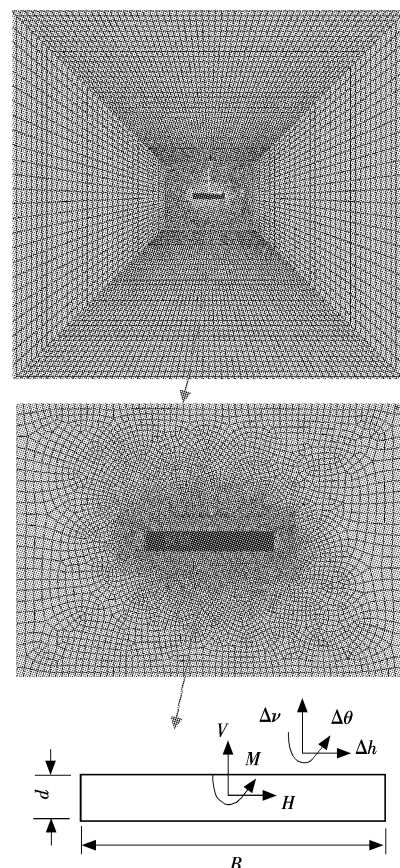


图 1 板锚-土相互作用的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of plate anchor and soil

和切向力为例, 先施加法向力至预定值, 然后施加并逐步增加切向力, 直至锚周围土达到极限状态。获得这时法向力和切向力的值, 即为法向力和切向力共同作用下的极限承载力。

3) 计算 3 种荷载作用下的承载力。先施加预定的法向力、切向力, 然后施加并逐步增加弯矩, 直至锚周围土达到极限状态, 获得这时板锚法向力、切向力和弯矩的值, 即为法向力、切向力和弯矩共同作用下的极限承载力。

为便于分析, 对承载力进行无量纲化处理, 得到板锚法向、切向和旋转的极限承载力系数为

$$\lambda_v = \frac{V_p}{B s_u}, \quad \lambda_H = \frac{H_p}{B s_u}, \quad \lambda_M = \frac{M_p}{B^2 s_u}, \tag{1}$$

式中 V_p, H_p 和 M_p 分别为法向、切向和弯矩的极限承载力。

1.2 数值模型验证

利用本文数值模型, 分别计算法向、切向和弯矩荷载单独作用下的极限承载力系数。法向极限承载力系数 $\lambda_{v, \max} = 12.15$, 切向极限承载力系数 $\lambda_{H, \max} = 4.696$, 弯矩极限承载力系数 $\lambda_{M, \max} = 1.661$ 。塑性极限理论的上限解^[5]分别为 12.10, 5.15 和 1.60。对比数值解和解析上限解, 法向和弯矩极限承载力系数计算结果基本一致, 切向极限承载力系数的数值解比解析上限解略偏小约 8.8%, 这表明本文建立的有限元模型合理。

1.3 组合荷载作用下平板锚承载力

利用本文数值模型, 计算 2 种不同荷载组合下的极限承载力, 结果如图 2—图 4 所示。其中, 图 2 为法向力和切向力共同作用下的极限承载力系数关系图。图 3 为弯矩和法向力共同作用下的极限承载力系数关系图。图 4 为弯矩和切向力共同作用下的极限承载力系数关系图。

从图 2 可以看出, 当平板锚遭受法向力作用时, 切向承载力系数小于单独切向力作用下的极限承载力系数。随着法向力增加, 切向承载力系数减小, 但开始缓慢减小, 而后减小速率快速增加。图 3—图 4 也有类似规律。

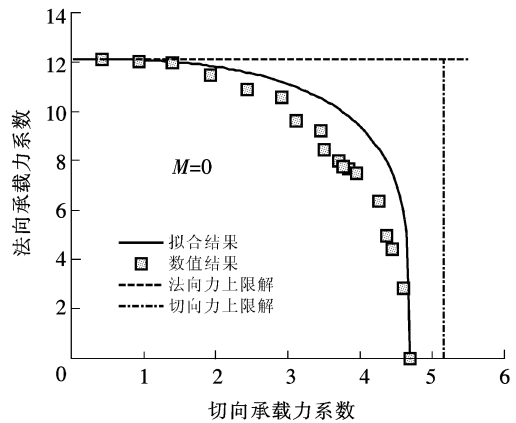


图 2 法向力和切向力共同作用下的极限承载力系数关系图

Fig. 2 Yield envelope of biaxial load of the normal force and shear loads

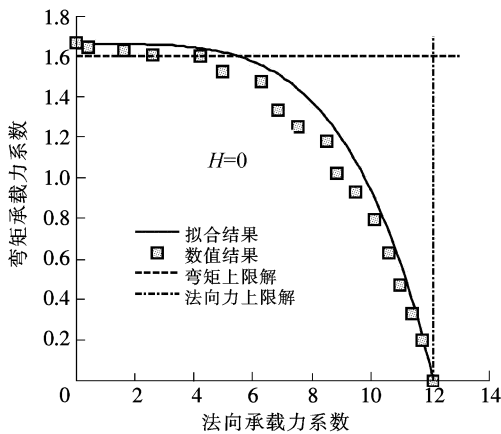


图 3 弯矩和法向力共同作用下的极限承载力系数关系图

Fig. 3 Yield envelope of biaxial load of the bending moment and normal loads

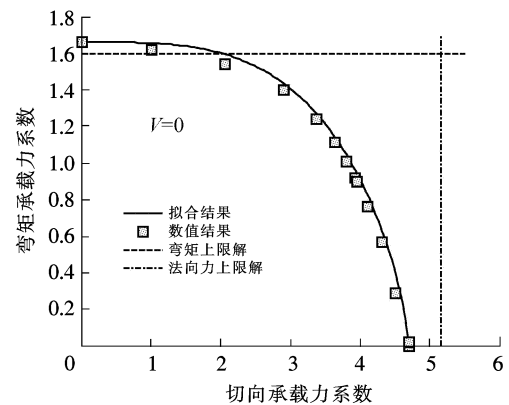


图 4 弯矩和切向力共同作用下的极限承载力系数关系图

Fig. 4 Yield envelope of biaxial load of the moment and shear loads

先按 $\lambda_V/\lambda_{V,max}$ 分别为 0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 施加一定的法向力, 然后对每一法向力, 再通过数值方法计算弯矩承载力系数和切向力承载力系数数据对, 结果如图 5 所示。

从图 5 可看出, 随着法向力荷载的增加, 弯矩和切向力承载力系数的包络面快速收缩。总体上随着 $\lambda_V/\lambda_{V,max}$ 的增加, 收缩速率增大, 当 $\lambda_V/\lambda_{V,max} > 0.5$ 时, 收缩速率增加明显。

2 组合荷载承载力系数包络图

Murff 建议使用式(2)拟合组合荷载共同作用下基础的承载力^[21]:

$$f = \left(\frac{V}{V_p}\right)^q - 1 + \left[\left(\frac{M}{M_p}\right)^m + \left(\frac{H}{H_p}\right)^n\right]^{1/p}, \quad (2)$$

式中 q, m, n 和 p 分别为拟合常数。 V_p, H_p, M_p 可表示为

$$V_p = B s_u \lambda_{V,max}, \quad (3)$$

$$M_p = B^2 s_u \lambda_{M,max}, \quad (4)$$

$$H_p = B s_u \lambda_{H,max}. \quad (5)$$

利用式(2)拟合图 2—图 5 的数值计算结果, 获得拟合系数 $m = 1.4, n = 3.5, p = 1.32, q = 4.14$ 。

2 种荷载组合作用下的拟合结果与数值计算结果的对比如图 2—图 4 所示。

由式(2)获得的 $V-M-H$ 空间板锚承载力系数包络面如图 6 所示。

利用图 6 可以判断承受组合荷载作用的板锚的安全性。若实际组合荷载落于包络面内, 实际荷载没有超过板锚的承载能力, 板锚安全。若实际组合荷载作用落于包络面上或包络面外, 实际荷载作用超过了板锚的极限承载能力, 板锚将失稳破坏。

3 结论

本文建立了组合荷载作用下平板锚承载变形的数值模型, 利用该模型分析了法向力、切向力和弯矩共同作用下板锚的极限承载力, 给出了组合荷载作用下板锚的极限承载力包络面拟合式, 主要获得了如下结论:

- 1) 建立的数值模型可用于预测组合荷载作用下板锚的极限承载力;
- 2) 随着法向力荷载的增加, 弯矩和切向力承载力系数的包络面快速收缩;

3) Murff 模型能较好地拟合组合荷载作用下板锚的极限承载力包络面, 从而为组合荷载作用下板锚的安全性评估提供依据。

参考文献/References:

[1] DAS B M, SHIN E C. Suction force below plate anchors in soft clay[J]. Marine Georesource and Geotechnology, 1994, 12(1): 230-234.
 [2] DAS B M, SINGH G. Uplift capacity of plate anchors in clay[C]//Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference. Gloden: ISOPE, 1994:436-442.

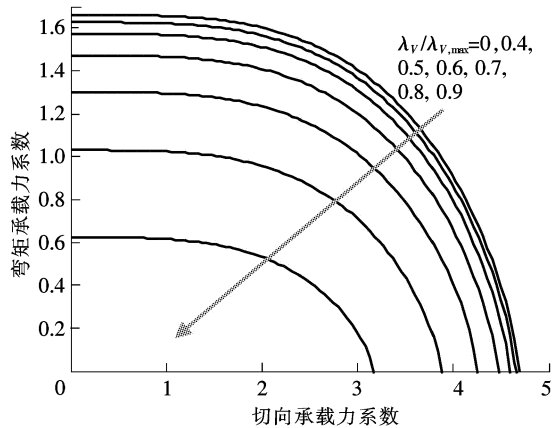


图 5 法向力、切向力和弯矩共同作用极限承载力
 Fig. 5 Limit capacity of combined loads of the normal force, shear loads and bending moment

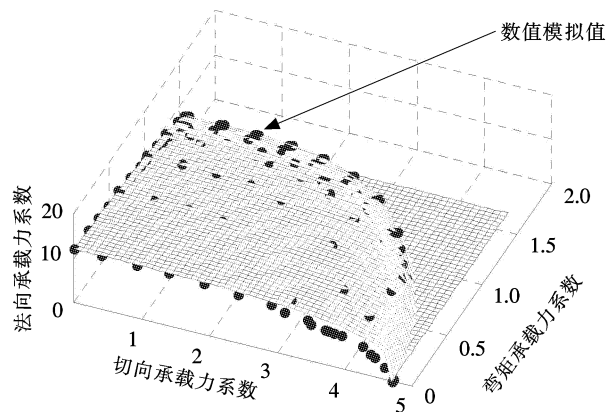


图 6 板锚的 V-M-H 极限承载力包络面
 Fig. 6 Yield envelope of V-M-H space for place anchor

- [3] SHIN E C, DASS R N, OMAR M T, et al. Mud suction force in the uplift of plate anchors in clay[C]// Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference. Gloden: ISOPE, 1994: 462-466.
- [4] RUINEN R M, DEGENKAMP G. First application of 12 stevmanta anchors (VLA) in the P27 taut leg mooring system[C]//Proceedings of the 11th Deep Offshore Technology Conference. Stavanger:[s. n.], 1999: 1-14.
- [5] O'NEILL M P, RANDOLPH M F. Modelling drag anchors in a drum centrifuge[J]. Int J Phys Model Geotech, 2001, 1(2): 29-41.
- [6] GAUDIN C, OLOUGHLIN C D, RANDOLPH M F, et al. Influence of the installation process on the performance of suction embedded plate anchors[J]. Géotechnique, 2006, 56(6): 381-391.
- [7] LIU H X, ZHANG W, ZHANG X W, et al. Experimental investigation on the penetration mechanism and kinematic behavior of drag anchors[J]. Applied Ocean Research, 2010, 32(4): 434-442.
- [8] DAHLBERG R, STROM P J. Unique onshore tests of deepwater drag-in plate anchors [C]// Proceedings of the 31st Offshore Technology Conference. Houston:[s. n.], 1999: 1-11.
- [9] HEYERDAHL H, EKLUND T. Testing of plate anchors [C]//Proceedings of the 33th Offshore Technology Conference. Houston:[s. n.], 2001: 1-11.
- [10] MERIFIELD R S, SLOAN S W, YU H S. Stability of plate anchors in undrained clay[J]. Géotechnique, 2001, 51(2): 141-153.
- [11] MERIFIELD R S, LYAMIN A V, SLOAN S W, et al. Three-dimensional lower bound solutions for stability of plate anchors in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 2003, 129(3): 243-253.
- [12] 王立忠, 舒恒. 不排水粘土中深埋锚板的抗拔承载力[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 829-836.
WANG Lizhong, SHU Heng. Pullout capacity of deeply embedded plate anchors in undrained clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 829-836.
- [13] 黄茂松, 余生兵. 基于块体集上限法的砂土中条形锚板抗拔承载力分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 201-207.
HUANG Maosong, YU Shengbing. Pull-out capacity of strip anchor plate in sand based on block set mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 201-207.
- [14] 于龙, 刘君, 孔宪京. 锚板在正常固结黏土中的承载力[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1427-1434.
YU Long, LIU Jun, KONG Xianjing. Stability of plate anchors in NC clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1427-1434.
- [15] YU Long, LIU Jun, KONG Xianjing, et al. Numerical study on plate anchor stability in clay[J]. Géotechnique, 2011, 61(3): 235-246.
- [16] 刘君, 于龙, 吴利玲. 饱和黏土中倾斜圆形锚板承载力分析[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(2): 229-234.
LIU Jun, YU Long, WU Liling. Pull-out capacity of inclined circular plate anchors in saturated clay[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(2): 229-234.
- [17] 王栋, 韩超. 海流作用下平板锚的抗拉承载力[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2243-2248.
WANG Dong, HAN Chao. Uplift capacity of plate anchors under loop current loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2243-2248.
- [18] 刘君, 胡宏. 砂土地基锚板基础抗拔承载力 PFC 数值分析[J]. 计算力学学报, 2013, 30(5): 677-682.
LIU Jun, HU Hong. PFC analysis of the uplift bearing capacity of plate anchors in sand[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(5): 677-682.
- [19] TIAN Y, CASSIDY M J, RANDOLPH M F, et al. A simple implementation of RITSS and its application in large deformation analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 56: 160-167.
- [20] TIAN Y, GAUDIN C, CASSIDY M J. Improving plate anchor design with a keying flap[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 2014, 140(5): 04014009.
- [21] MURFF J D. Limit analysis of multi-footing foundation systems[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Morgantown:[s. n.], 1994: 223-244.