



饱和软黏土中吸力锚的承载能力数值分析*

韩智臣, 孙昭晨, 梁书秀

(大连理工大学港口、海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 利用大型通用有限元软件ABAQUS, 基于总应力分析法, 建立了饱和软黏土中吸力锚的三维有限元数值模型, 通过与物理模型试验对比, 验证了数值模型的正确性。计算分析了吸力锚的水平承载力特性及其破坏模式、最优系缆深度上的倾斜承载力包络图。通过对有限元结果进行拟合分析, 提出了吸力锚承载能力的简化计算公式, 公式中考虑了长径比、加载角度和土体不排水抗剪强度的影响。

关键词: 饱和软黏土; 最优系缆深度; 承载力包络图; 长径比; 加载角度

中图分类号: U 656.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0162-06

Numerical analysis of bearing capacity of suction caissons in saturated soft clay

HAN Zhi-chen, SUN Zhao-chen, LIANG Shu-xiu

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the total stress method, a three-dimensional FEM numerical model of suction caissons in saturated soft clay is presented by the finite element analysis software ABAQUS. The numerical model is verified by the laboratory test results. In the numerical analysis, the load bearing characteristics, failure mechanism and the envelope diagram on the optimal mooring point are investigated. By fitting analysis of the numerical results, a simplified method for the estimation of the uplift capacity for suction caissons is described. The expressions developed in this paper take into account the influence of the aspect ratio of the caisson, angle of inclination of the loading and the undrained shear strength of the soil.

Key words: saturated soft clay; optimal mooring point; envelope diagram; aspect ratio; angle of inclination

吸力锚是一种顶端封闭、底端开口的圆柱形薄壁结构, 通常由钢材或者混凝土制成, 安装时先依靠自身重力沉放到一定的深度, 而后通过连接在顶端的真空泵抽水形成真空, 在压力差作用下最终贯入到土中, 安装完毕后拆卸真空泵并将顶端密封。与传统的桩基相比, 吸力锚具有安装便捷、费用低、可重复利用、不受水深限制等优点, 近年来越来越多地应用于海上风机、浮式结构、张力腿平台(TLP)、立柱式平台(SPAR)等。

吸力锚作为海洋结构基础, 承受着锚链传递的平台上部所受的风、浪等复杂荷载作用, 锚链

布置形式决定着吸力锚承受的荷载方向, 以常见的浮式系统、张力腿平台、立柱式平台为例, 吸力锚所受的分别为水平荷载、竖直荷载和倾斜荷载。因此, 研究吸力锚的水平、竖直、倾斜承载能力具有重要意义。目前, 国内吸力锚的有限元分析主要是针对承载力特性和破坏机制, 考察长径比、荷载工况、系缆位置、主动区是否开裂、地基非均质性等因素的影响^[1-4], 而国外Deng等^[5-9]在有限元分析的基础上提出了吸力锚的简化计算公式, 不过其计算土质假设为均质且有限元计算结果没有和模型试验对比验证。

收稿日期: 2012-09-04

***基金项目:** 国家创新研究群体科学基金(50921001);

作者简介: 韩智臣(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构与海洋土相互作用方面的研究。

本文在前人研究基础上,建立了非均质土中吸力锚的三维有限元数值模型,并与模型试验对比,考察了加载深度对水平极限承载力的影响,确定出最优系缆深度,并对最优系缆深度上吸力锚的承载力特性进行计算分析,根据有限元结果得到最优系缆点上倾斜承载力包络图,通过拟合分析提出了非均质土中吸力锚承载力简化计算公式。

1 有限元模型建立与试验验证

1.1 有限元模型

基于不排水总应力分析法,采用大型通用有限元软件ABAQUS平台建立模型。由于吸力锚的对称性,取吸力锚和土体的一半进行三维有限元数值建模,建模过程不考虑吸力锚的工作水深和安装效应,并假定吸力锚已经安装完成,初始应力场为吸力锚和土体在重力作用下的应力场,计算简化模型如图1所示。

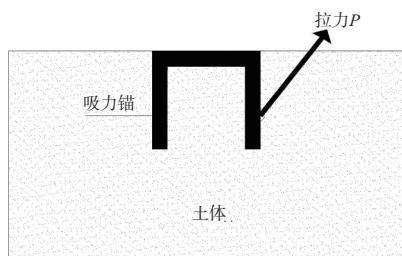


图1 简化模型

把吸力锚视为理想线弹性材料,依据一般钢材的力学参数,弹性模量取为 $E=2.05 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$,为了保证数值分析中的地应力平衡其密度取为土体密度,采用8节点缩减积分单元。对于饱和软黏土,采用Mohr-Coulomb理想弹塑性本构模型,其摩擦角取为 $\varphi=0$,黏聚力取为土体的不排水抗剪强度,弹性模量取为 $E=500S_u$,泊松比为 $\nu=0.49$,即近似不可压缩。为消除边界影响,土体计算范围沿径向取20倍的吸力锚半径、沿深度方向取2倍的吸力锚高度,由于不可压缩,采用8节点杂交单元。网格剖分如图2所示。

吸力锚和土体的接触面采用ABAQUS中的“接触对”算法,通过定义的接触面相互作用力学传递模型来模拟界面的摩擦接触特性。接触面的法向模型采用“硬接触”,只有当两个接触面相互

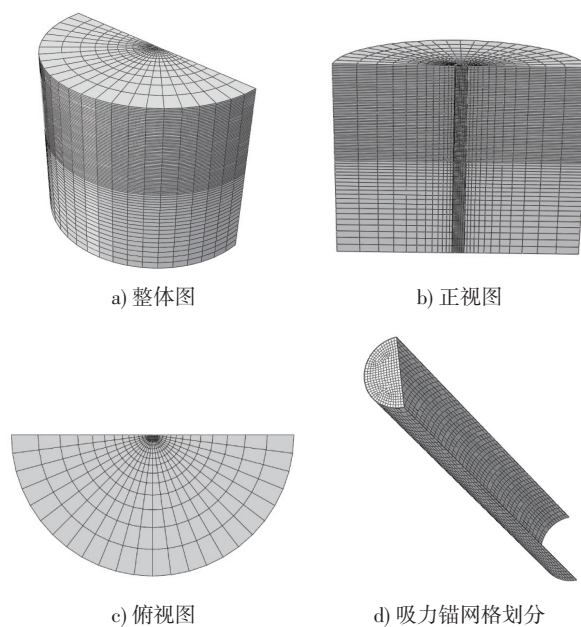


图2 有限元网格剖分

接触、压紧时才能传递法向压力,若两物体之间有间隙时不传递法向压力。接触面的切向行为采用ABAQUS中默认的Coulomb摩擦模型。该模型用摩擦系数 μ 来表征接触面之间的摩擦行为,在表面拽力达到一个临界剪切应力值之前,两面之间无切向运动,其值可表示为下式:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu P \quad (1)$$

式中: τ_{crit} 为临界剪切应力; μ 为摩擦系数; P 为法向应力值。栾茂田等^[1]详细论述了摩擦系数取值对计算结果的影响,在不排水条件下,吸力锚的承载力完全由周围土体的强度决定,因此,本文在锚与土的接触模型中,摩擦系数取为 $\mu=1$,以保证吸力锚的破坏是由于土体屈服导致的。

当计算得到的荷载位移曲线近似水平时,即认为土体已完全屈服,此时得到的为吸力锚极限承载力。

1.2 试验验证

为了验证上述有限元模型的正确性,本文对文献[10]中的吸力锚受倾斜荷载作用系列试验进行了数值模拟。试验中吸力锚的直径为 $d=102$ mm,最终贯入深度为 $L=813$ mm,桶壁厚度 $t=0.8$ mm,加载点在距泥面 $2L/3$ 贯入深度处,加载方向与水平面夹角分别为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 。试验中土体密度随埋深的变化为

$$\rho = 0.144z + 1.36 \quad (2)$$

式中: z 为埋深 (m); ρ 为密度 (t/m^3)。土体不排水抗剪强度的测定采用了锥形触探仪、T-bar、十字剪切板等4种仪器, 本文数值建模参数采用由T-bar试验得到的数据, 将斜率和截距平均后得到随埋深 z 线性变化的土体强度为

$$S_u = 0.85z + 0.069 \quad (3)$$

式中: z 为埋深 (m); S_u 为不排水抗剪强度 (kPa)。

图3为有限元计算得到的荷载位移曲线, 表1将有限元计算得到的极限荷载值与EI-Sherbiny测得的值进行了比较, 最大误差仅为 8.6%, 证明了本文有限元计算模型的正确性。

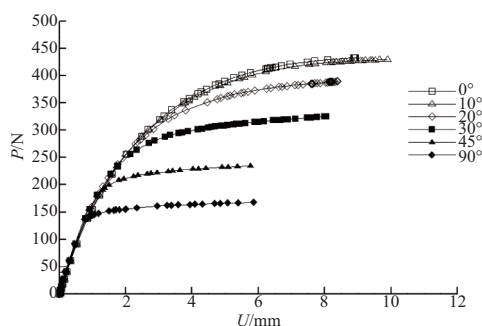


图3 计算得到的不同加载角度荷载位移关系曲线

表1 计算值和试验值的比较

加载角度/(°)	试验值/N	计算值/N	相对误差/%
0	404.07	433.18	7.2
10	400.51	429.58	7.3
20	386.73	389.46	0.7
30	347.17	325.48	6.2
45	256.49	234.54	8.6
90	171.14	167.62	2.1

2 水平承载力特性与破坏模式

2.1 最优系缆深度

吸力锚在水平荷载作用下, 一般用水平承载力系数表示其水平承载力:

$$N_h = \frac{H_{ult}}{dL\bar{S}_u} \quad (4)$$

式中: N_h 为水平承载力系数; H_{ult} 为水平极限荷载; d 为锚桶直径; L 为锚的埋深; $\bar{S}_u$ 为锚桶周围土体平均不排水抗剪强度。

本文利用前述有限元模型, 针对 $L=4d, 5d, 6d, 7d, 8d$ 共5种长径比的吸力锚, 对 $z=0, L/9, 2L/9, 3L/9, 4L/9, 5L/9, 2L/3, 7L/9, 8L/9, L$

共10个不同深度系缆点的水平极限承载力进行计算, 得到水平极限承载力与系缆点位置关系曲线, 如图4所示。最优系缆点在 $z=2L/3$ 处, 此处水平极限承载力最大, 水平承载力先是随系缆深度的增加而增加, 到达最大值, 而后随着系缆深度的增加而减小。

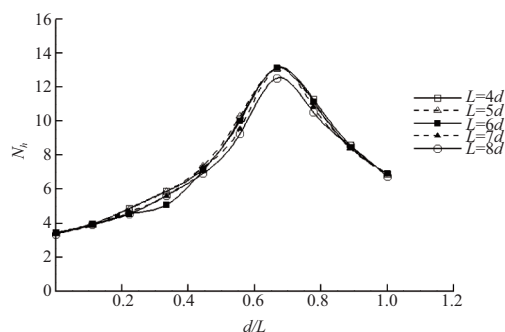


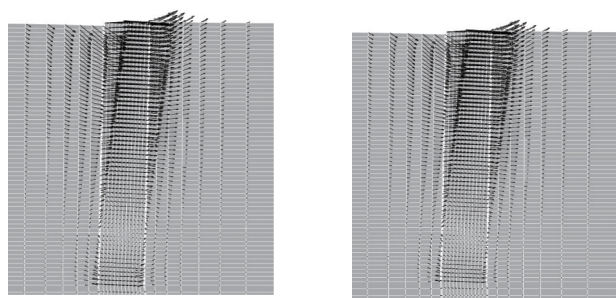
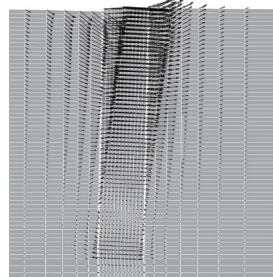
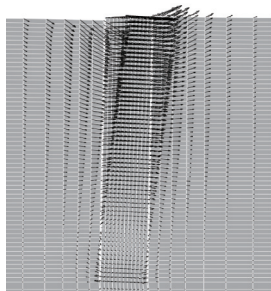
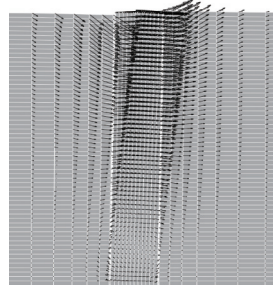
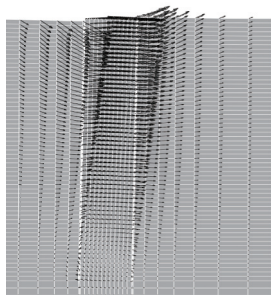
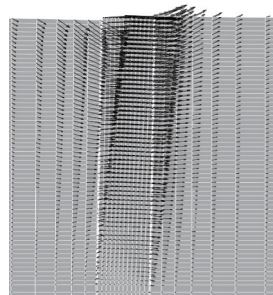
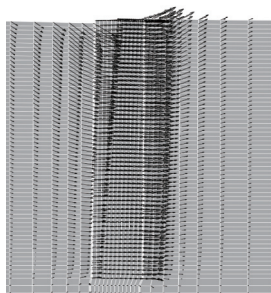
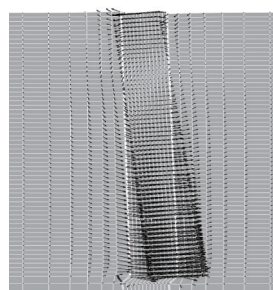
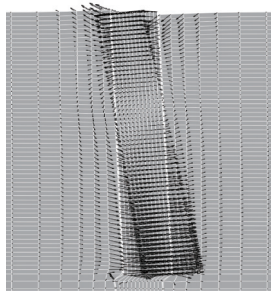
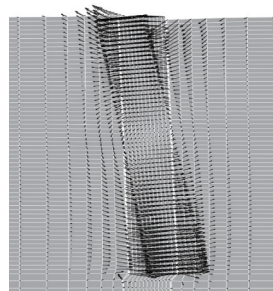
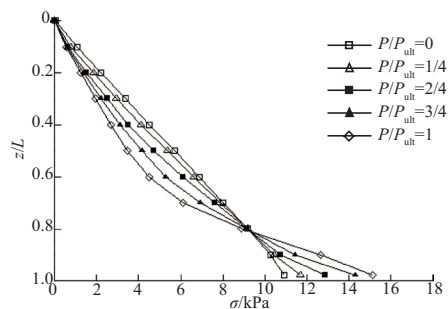
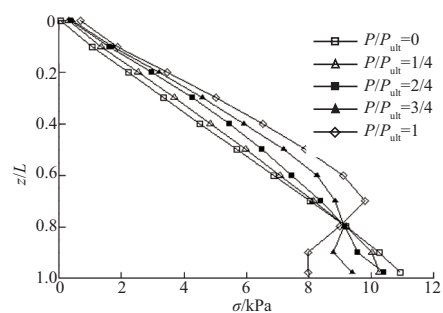
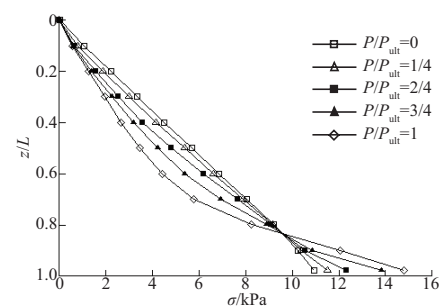
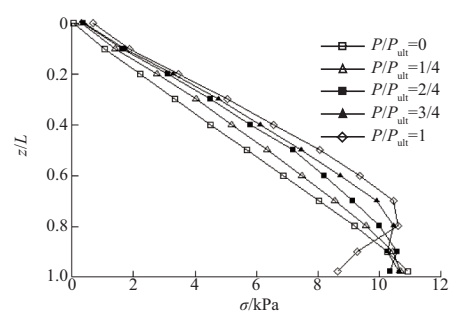
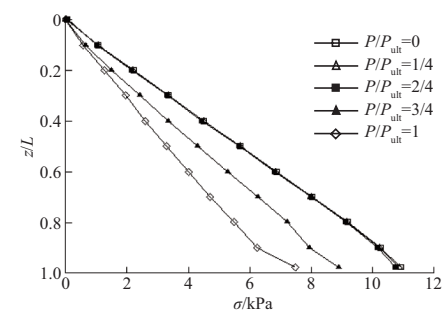
图4 不同深度系缆点水平极限承载力

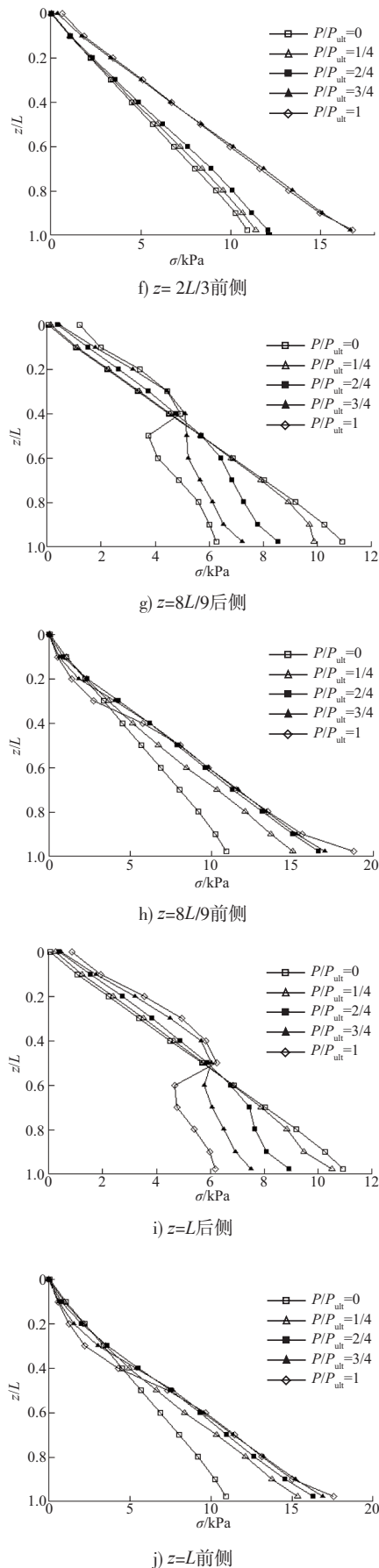
2.2 破坏模式

本文列出长径比 $L=8d$ 的计算结果来说明吸力锚在水平荷载作用下的破坏模式。由图5的不同深度系缆点位移矢量图可知: 系缆点在 $z < 2L/3$ 时, 吸力锚发生旋转且旋转中心在锚的下半部; 系缆点在 $z = 2L/3$ 时, 吸力锚沿着水平方向平动, 没有旋转; 系缆点在 $z > 2L/3$ 时, 吸力锚发生旋转, 旋转中心在锚的上半部。以上3种运动形式与张其一^[3]的结论是一致的, 分别称之为前倾转动、平移滑动、后仰转动。平移滑动模式对于吸力锚是最为有利的, 此时吸力锚的水平承载能力最大。

2.3 土压力分布

在本文中, 将吸力锚外与荷载方向一致的那侧称为前侧, 与荷载方向相反的那侧称为后侧。由图6所示的土压力发展与分布图可知: 1) 对于 $z=2L/3$ 系缆点, 土压力随深度近似线性变化, 不同水平荷载对应的斜率不一样, 前侧土压力随着荷载增大而增大, 完全为被动土压力, 后侧土压力随荷载的增大而减小, 完全为主动土压力, 这反映出吸力锚在平移滑动模式下土压力的发展、分布特点; 2) 对于 $z < 2L/3$ 系缆点, 前、后侧某一点处的土压力不随荷载增加而改变, 后侧随着荷载增加该点上方土压力减小, 下方土压力增大, 前侧则随着荷载增加该点上方土压力增大, 下方土压力减小, 这是锚桶发生前倾转动所引起的;

a) $z=0$ b) $z=L/9$ c) $z=2L/9$ d) $z=L/3$ e) $z=4L/9$ f) $z=5L/9$ g) $z=2L/3$ h) $z=7L/9$ i) $z=8L/9$ j) $z=L$ 图5 $L=8d$ 不同深度系统缆点的位移矢量a) $z=0$ 后侧b) $z=0$ 前侧c) $z=2L/9$ 后侧d) $z=2L/9$ 前侧e) $z=2L/3$ 后侧

图6 $L=8d$ 不同系缆点上土压力的发展与分布

3) 对于 $z > 2L/3$ 系缆点, 后侧上半部某一点的土压力不随荷载增加而改变, 随着荷载增加该点上方土压力增大, 下方土压力减小, 而前侧也存在这样一点, 但其上下方变化趋势与后侧的正好相反, 这是后仰转动模式下土压力的发展、分布特点。

3 承载能力的简化计算公式

3.1 竖向承载力

Deng等^[8]认为吸力锚的竖向极限承载力可表示为

$$V_{ult} = AN_p \xi_{cs} \xi_{ce} \bar{S}_u \quad (5)$$

式中: 为 V_{ult} 竖向极限承载力; A 为吸力锚的横截面积; N_p 为竖向承载力系数; ξ_{cs} 和 ξ_{ce} 为与基础形状、埋深有关的系数, 对于吸力锚通常取 $\xi_{cs}=1+0.4L/d$, $\xi_{ce}=1.2$ 。

根据式 (5), 本文通过有限元模型计算得到的吸力锚竖向承载力系数如表2所示, 将不同长径比的承载力系数平均可得 $N_p=10.03$, 由此可得竖向承载力计算公式为:

$$V_{ult} = 3.009\pi d^2 \left(1 + \frac{0.4L}{d}\right) \bar{S}_u \quad (6)$$

表2 竖向承载力系数

长径比	4	5	6	7	8
竖向承载力系数	9.96	10.30	10.11	9.98	9.79

3.2 水平承载力

水平极限承载力常表示成式 (4) 形式, 本文根据有限元模型计算结果得到最优系缆深度上不同长径比的水平承载力系数, 如表3所示, 平均后得到 $N_h=13.04$, 再由式 (4) 得到水平极限承载力计算公式为:

$$H_{ult} = 13.04dL\bar{S}_u \quad (7)$$

表3 水平承载力系数

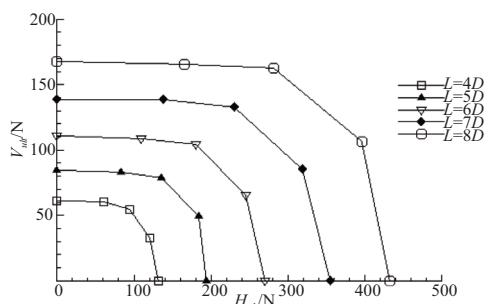
长径比	4	5	6	7	8
水平承载力系数	13.10	13.09	13.14	13.11	12.77

3.3 倾斜承载力

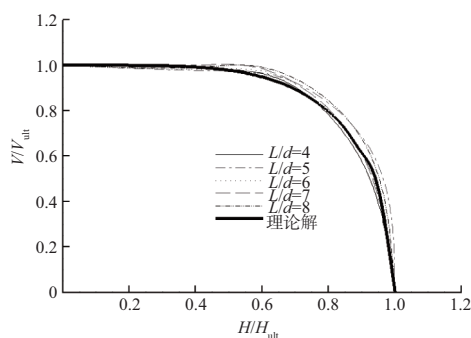
图7为有限元结果得到的最优系缆深度上水平、竖直平面承载力包络图, 通过归一化结果的曲线拟合, 可以得到不同倾角的极限承载力与水平、竖直极限承载力关系式:

$$f(H, V) = \left(\frac{V}{V_{ult}} \right)^2 + \left(\frac{H}{H_{ult}} \right)^{4.5} - 1 = 0 \quad (8)$$

式中: V_{ult} 和 H_{ult} 分别为竖直极限承载力、水平极限承载力, 可分别由式(6), (7) 求出。



a) 承载力包络图



b) 归一化

图7 倾斜承载力包络图

4 结论

1) 有限元模型采用Mohr-Coulomb理想弹塑性本构模型, 粘聚力取为T-bar测得的不排水抗剪强度, 数值计算结果与试验较好吻合。

2) 非均质土中吸力锚在不同深度系缆点的破坏模式、土压力分布特点和极限承载力是不同的, 最优系缆深度在 $z=2L/3$ 处, 此时的水平极限承载力最大。

3) 给出了非均质土中吸力锚最优系缆点上竖向、水平极限承载力计算公式(6), (7), 式中

考虑了锚的长径比、不排水抗剪强度的影响。

4) 得到了最优系缆点上的倾斜承载力包络图, 通过归一化包络图的拟合分析, 给出非均质土中吸力锚的倾斜极限承载力简化计算公式(7)。

参考文献:

- [1] 栾茂田, 范庆来, 杨庆. 非均质软土地基上吸力式沉箱抗拔承载力数值分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1 054-1 059.
- [2] 武科, 栾茂田, 范庆来, 等. 倾斜荷载作用下桶形基础承载力特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1 095-1 101.
- [3] 张其一, 董胜, 王青华. 深海吸力锚水平极限承载力研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(5): 114-119.
- [4] 王志云. 软土地基上吸力式基础的抗拔承载特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [5] Deng W, Carter J P. Predictions of the vertical pullout capacity of suction caissons in fine-grained soils[R]. Australia: The university of Sydney, 1999.
- [6] Deng W, Carter J P. Analysis of suction caissons in uniform soils subjected to inclined uplift loading[R]. Australia: The university of Sydney, 1999.
- [7] Deng W, Carter J P. A theoretical study of the vertical uplift capacity of suction caissons [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2002, 12(2):89-97.
- [8] Deng W, Carter J P. Uplift capacity of suction caissons in uniform soil[R]. Melbourne, Australia paper on CD, 2000.
- [9] Supachawarote C, Randolph M F. Inclined load capacity of suction caisson in clay [R]. Perth: The University of Western Australia, 2007.
- [10] El-Sherbiny R M. Performance of suction anchors in normally consolidated clay[D]. Austin: The University of Texast, 2005.

(本文编辑 武亚庆)