

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0686-05

复合加载条件下沉箱基础稳定性的三维效应

范庆来^{1,2}, 李璞晟³, 倪宏革¹, 栾茂田²

(1. 鲁东大学 岩土工程重点实验室, 山东 烟台 264025; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;
3. 潍坊市公路管理局, 山东 潍坊 261206)

摘 要: 联合采用 swipe 加载模式与固定位移比加载模式, 对于吸力式沉箱基础在水平荷载 H 与力矩 M 的复合加载条件下的稳定性进行比较系统的三维有限元分析, 主要探讨了基础埋深与直径之比、地基土不排水强度的非均质性对于基础在 $H-M$ 荷载空间内的破坏包络轨迹的影响, 揭示了地基在不同荷载分量组合条件下的失稳破坏机制, 并与平面应变假定下得到的结果进行了比较。计算结果表明: 平面应变与三维情况下基础的破坏包络面形状有较大差异, 分析基础稳定性时, 必须考虑其三维效应。在三维情况下, 非均质土中埋深与直径之比较小的基础的破坏包络面仍然会向负方向倾斜, 已有的包络面方程明显高估这种情况下沉箱基础在正向水平荷载与力矩联合作用下的承载力, 从而导致基础设计偏于不安全。

关 键 词: 基础; 破坏包络面; 复合加载; 非均质; 失稳机制

中图分类号: U 443.13+2

文献标识码: A

Three dimensional effect on stability of suction caisson under combined loading

FAN Qing-lai^{1,2}, LI Pu-sheng³, NI Hong-ge¹, LUAN Mao-tian²

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China
3. Weifang Highway Administration, Weifang, Shandong 261206, China)

Abstract: Combined with swipe loading method and fixed displacement ratio method, the bearing capacity of suction caisson foundations subjected to horizontal and moment combined loading is explored through three dimensional finite element numerical studies. The effect of embedment to diameter ratio and soil strength nonhomogeneity on the $H-M$ failure envelope of caisson foundations is investigated; and the soil deformation mechanism under various combinations of load components is shown. Through comparison with results under plane strain assumption, it is shown that the shape of failure envelopes of caisson foundations considering three dimensional effect varies from that under plane strain assumption; therefore to evaluate the stability of caisson foundation should account for the three dimensional effect. For nonhomogeneous soil, the failure envelope of caisson foundations with shallower embedment is negatively oblique. The equation of failure envelope available overestimates significantly the bearing capacity of caisson under this condition subjected to positive lateral and moment combined loading, and leads design of caisson foundation to unsafe side.

Key words: foundation; failure envelope; combined loading; nonhomogeneity; failure mechanism

1 前 言

吸力式沉箱基础是一种基底下带有竖向增强板的海洋基础形式, 比较适宜于软土地基, 被广泛用于海上采油平台以及海上风力发电机的基础。在海洋环境下, 基础除了承受上部结构物的竖向自重荷载以外, 一般还要遭受波浪、暴风等所引起的水平荷载、力矩荷载。最近十几年, 国内外研究广泛

采用破坏包络面理论来解决这种复合加载条件下的基础稳定性问题。Bransby 和 Randolph^[1]对于裙板式基础进行了有限元分析和上限极限分析, 但在分析中没有考虑裙板底部以上土体对于基础承载力的贡献。Bransby 和 Randolph^[2]、Gourvenec^[3]、Yun 和 Bransby^[4]通过有限元分析考察了埋深对于基础破坏包络面的影响, 在计算模型中将基础简化为等埋深的实体浅基础, 从而忽略了裙板内部土体的变形

收稿日期: 2010-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50909048, 50639010); 山东省自然科学基金资助项目 (No. ZR2010EQ036)。

第一作者简介: 范庆来, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事海洋土力学基本理论与数值分析、新型基础形式性能评价以及滨海地区软基处理等方面研究工作。Email: fanqinglai@ldu.edu.cn

机制对于基础承载力的影响。最近, Bransby 和 Yun^[5]、范庆来等^[6]进一步考虑了基础的实际截面形状, 系统研究了裙板内部土体变形对于该基础在复合加载条件下的破坏包络轨迹的影响, 指出在非均质土中, 埋深与宽度之比为 0.2 的裙板式基础的破坏包络面可能出现负方向倾斜, 但上述结论都是在平面应变假定下得到的, 还没有在三维情况下得到验证。本文基于大型通用有限元软件 ABAQUS, 对于力矩与水平荷载联合作用下, 均质和非均质土中沉箱基础的破坏包络面进行了系统的三维有限元数值分析, 探讨了基础埋深与直径之比、地基土不排水强度的非均质性对于基础破坏包络面的影响, 并与平面应变情况下得到的包络面进行了对比。

2 有限元模型

沉箱基础直径为 $B = 10 \text{ m}$, 埋深为 D , 桶壁厚度取为 $t = 0.02B$, 作用在不排水饱和软黏土地基上, 基础和地基间假定为完全黏结且无脱离接触现象^[1-6]。为减少有限元计算过程中地基模型的边界效应影响, 地基模型的直径取为 $10B$, 深度取为 $3B$ 。 $D/B=0.5$ 的有限元数值计算模型如图 1 所示。采用 2 阶 20 节点缩减积分单元, 在沉箱基础附近的局部区域加密网格。为了与已有结果^[1-6]进行比较, 在计算中不考虑沉箱基础本身的变形, 因此, 采用解析刚体单元模拟。

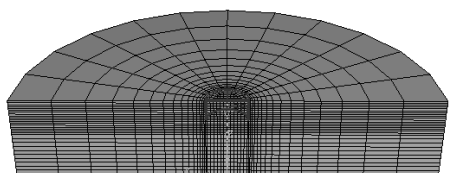


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element meshes

从极限分析角度来看, 不排水条件下的饱和软黏土可以用基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型来模拟。为了与平面应变情况下的计算结果^[6]进行对比, 在分析中, 对于均质土, 不排水强度 $S_u = 5 \text{ kPa}$, 而对于非均质土,

$$S_u = S_{um} + kz \quad (1)$$

式中: S_{um} 为地基表面处的不排水强度; k 为不排水强度随着深度 z 的增长率, (kPa/m)。

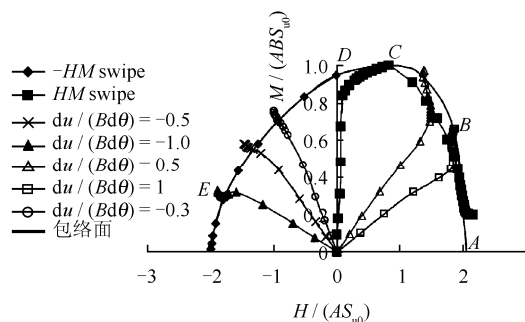
在本文计算中, 土体变形模量 $E = 400 S_u$, 泊松比 $\nu = 0.49$ 。非均质土假定为正常固结土, $S_{um} = 0$, $k = 1.2 \text{ kPa/m}$, 应该指出, 将计算得到的承载力采用裙板底部的不排水强度 $S_{u0} = S_{um} + kD$ 进行归一化, S_{um} 和 k 的取值不会影响结果的一般

性。采用该有限元模型计算单纯水平荷载作用下沉箱抗拔承载力, 其结果的合理性已经得到了模型试验验证^[7]。

为了得到基础的破坏包络面, 一般需要联合进行 swipe 加载和若干次固定位移比 ($du / (Bd\theta)$ 为常数) 加载试验, u 和 θ 分别是基础水平位移、转角。swipe 加载方法由剑桥大学 Tan 提出, 通过特殊加载路径直接寻找破坏包络轨迹上的每个荷载组合点^[8]。为了与已有研究结果^[1-6]进行对比, 本文将荷载参考点取在沉箱底面中心处。

3 地基失稳机制

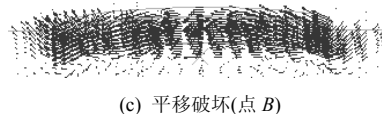
对于均质和非均质土中 $D/B=0.1$ 、0.2、0.5 和 1.0 的沉箱基础分别进行了数值分析。以 $D/B=0.1$ 和 1.0 两种情况说明不同荷载分量组合条件下地基破坏时的位移矢量, 如图 2~4 所示。



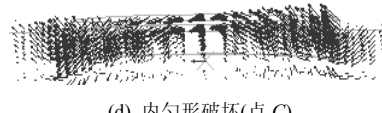
(a) 包络面



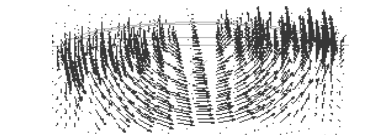
(b) 勺形破坏(点 A)



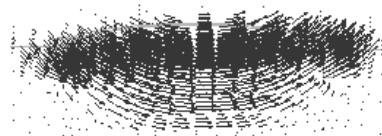
(c) 平移破坏(点 B)



(d) 内勺形破坏(点 C)



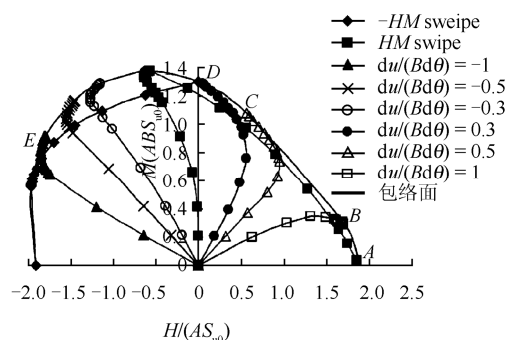
(e) 圆勺形破坏(点 D)



(f) 反向勺形破坏(点 E)

图 2 均质土中 $D/B = 0.1$ 的沉箱基础失稳机制

Fig.2 Failure mechanisms of caisson foundation with $D/B = 0.1$ in homogeneous soil



(a) 包络面



(b) 平移破坏(点 A)



(c) 内勾形破坏(点 B)



(d) 内勾形破坏(点 C)



(e) 双内勾形破坏(点 D)

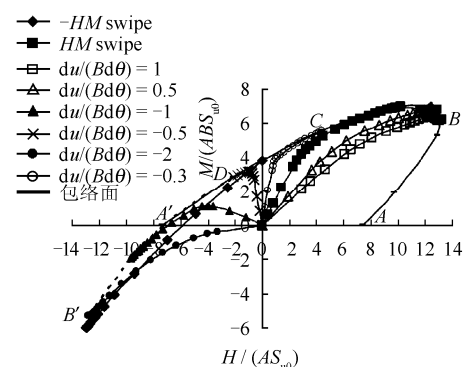


(f) 反向平移破坏(点 E)

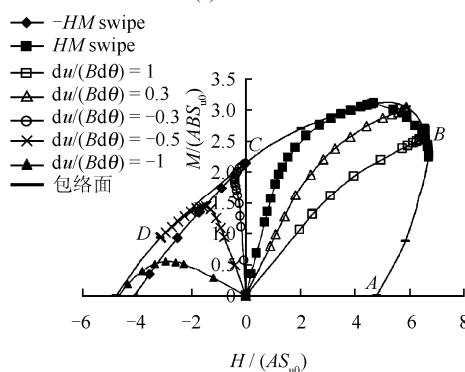
图 3 非均质土中 $D/B = 0.1$ 的沉箱基础失稳机制Fig.3 Failure mechanisms of caisson foundation with $D/B = 0.1$ in nonhomogeneous soil

通过图 2(a)和图 3(a)的比较可以看到, 相对于平面应变分析结果, 在三维情况下, 非均质土中埋深与直径之比较小的基础的破坏包络面仍然会向负方向倾斜。在相同位移比加载情况下, 均质和非均质地基中埋深较浅的吸力式沉箱基础表现出完全不同的失稳破坏模式。由于非均质地基浅层土体的不排水抗剪强度较低, 基础失稳时土体剪切变形区域主要位于基础底面以上、裙板内部的浅层土体, 所以在包络面的点 B、C 和 D 分别表现出内勾形和双内勾形破坏模式, 如图 3(c)~(e)所示。

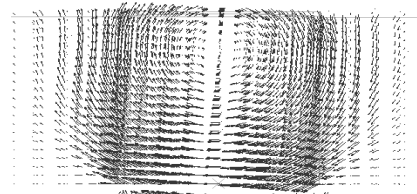
与 $D/B=0.1$ 的沉箱基础不同, 均质土和非均质土中 $D/B=1$ 的基础破坏包络面都向正方向, 即向第 1 象限倾斜, 而且在相同位移比加载情况下, 均质和非均质地基中埋深较大的吸力式沉箱基础表现出类似的失稳破坏模式, 如图 4(c)~(f)所示。这是因



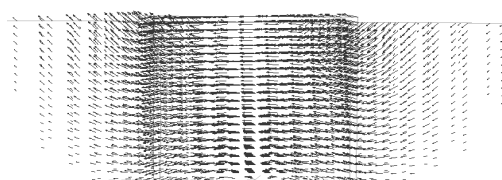
(a) 均质土



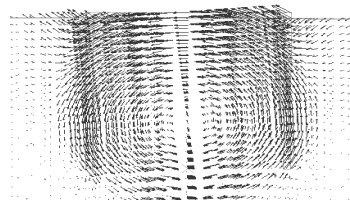
(b) 非均质土



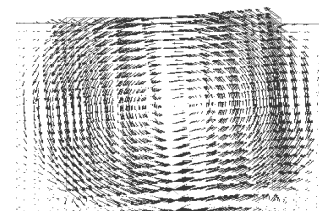
(c) 勾形破坏(点 A)



(d) 平移破坏(点 B)



(e) 勾形-楔体组合破坏(点 C)



(f) 圆勾形破坏(点 D)

图 4 $D/B = 1$ 的沉箱基础失稳机制Fig.4 Failure mechanisms of caisson foundation with $D/B = 1$

为随着埋深的增加, 非均质土地基埋深范围内土体的平均抗剪强度在增加, 因此, 埋深较大的基础在正常固结土中也没有发生内勾形或双内勾形破坏模式。这在一定程度上解释了非均质土中埋深较小的基础破坏包络面具有负倾斜特性, 而埋深较大的基础包络面出现正倾斜的原因。

通过图 2(a)和图 4(a)的对比可以看到, 虽然均质土地基中基础包络面都产生正倾斜现象, 但埋深较大的基础包络面倾斜程度比埋深较浅的基础明显增大。

值得注意的是, 在图 4(a)中, $-HM$ swipe 加载路径与固定位移比加载路径 $du/(Bd\theta)=-1$ 和 $du/(Bd\theta)=-2$ 都由第 2 象限进入了第 3 象限, 从而在第 3 象限确定出来一部分包络面 $A'B'$, 如图 4(a)中的虚线所示。根据破坏包络面的对称性^[8], 第 1 象限中的包络面 AB 段是由 $A'B'$ 关于坐标系原点对称而得到的。同理, 图 4(b)中的 AB 段也是这样确定出的。对于埋深较大的沉箱基础, 在联合采用 swipe 加载与固定位移比加载模式进行数值加载试验时, 都会出现这种现象。这是由于在埋深较大情况下, 基础的水平位移自由度 u 与转角自由度 θ 的耦合效应变得非常明显所致^[3]。

4 三维与平面应变情况结果对比

将三维情况下所得破坏包络面与文献[9]中的平面应变计算结果进行了对比, 如图 5 和 6 所示。通过图 5(b)可以看到, 随着基础埋深的增大, 三维与平面应变情况下所得包络面之间的形状差异也趋于明显。这种差别在第 1 象限表现得特别显著, 而在第 2 象限相对较小。另外, 在埋深较小情况下, 式(1)的计算结果与本文有限元计算结果差别不大, 但在埋深与直径(或宽度)之比大于 0.2 时, 式(1)明显低估了均质地基中基础在正向水平荷载与力矩作用下的承载力。

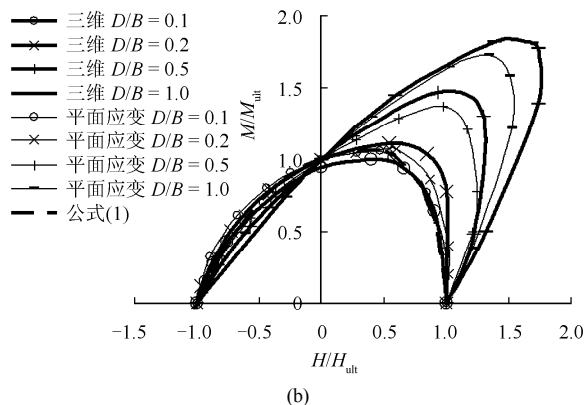
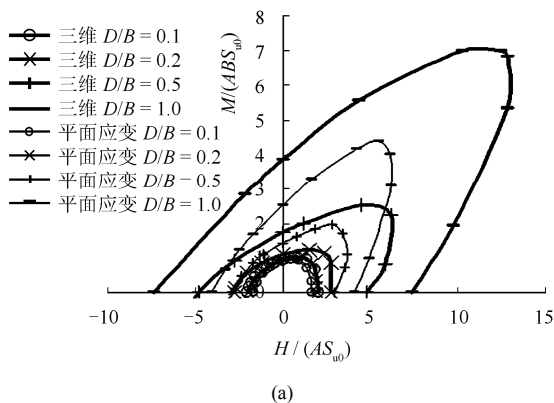


图 5 均质土中沉箱基础破坏包络面
Fig.5 Failure envelopes of caisson foundations in homogeneous soil

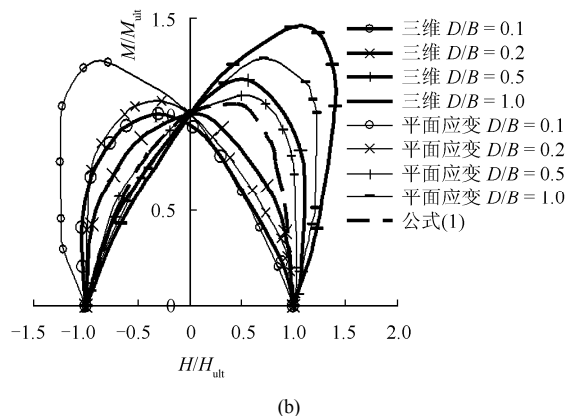
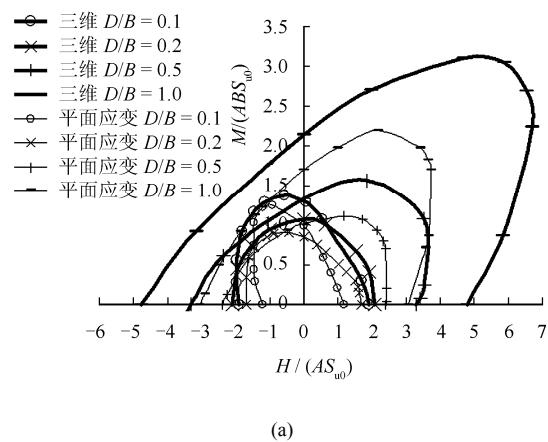


图 6 非均质土中沉箱基础破坏包络面
Fig.6 Failure envelopes of caisson foundations in nonhomogeneous soil

从图 6(b)可以看到, 非均质土中埋深较小的基础在三维与平面应变情况下所得包络面之间的形状差异主要反映在第 2 象限, 而对于埋深较大基础, 形状差别仍然表现在第 1 象限。而且, 式(1)明显高估了埋深较浅 ($D/B \leq 0.2$) 的沉箱基础在正向水平荷载与力矩联合作用下的承载力, 这将导致吸力式沉箱基础设计偏于不安全。因此, 为了工程上可以方便采用一致的失稳破坏标准, 评价不同埋深情况下沉箱基础稳定性, 必须提出新的统一破坏包

络面函数形式。

根据埋深为 0 的条形和圆形浅基础破坏包络面形状比较类似,很多学者认为,基础的平面形状与尺寸对其破坏包络面形状影响不大,即可以不考虑三维效应^[9-10]。但从图 5、6 可以看到,平面应变与三维情况下基础的破坏包络面形状有较大差异,这可能是由于具有一定埋深情况下,沉箱基础的侧摩阻力对于基础承载力的贡献相对较大,而埋深为 0 时,基础承载力则完全依赖于底面端阻力。因此,对于具有一定埋深的吸力式沉箱,分析基础稳定性时,必须考虑其三维效应。

5 结 论

(1) 在三维情况下,非均质土中埋深与直径之比较小的基础的破坏包络面仍然会向负方向倾斜,这是由于在一定的位移比加载情况下,地基破坏机制中产生了内勺形或双内勺形失稳模式。

(2) 已有的破坏包络面方程明显高估非均质土中埋深较浅的沉箱基础在正向水平荷载与力矩联合作用下的承载力,同时低估埋深较大基础的承载力,因此,必须提出新的统一破坏包络面函数形式。

(3) 对于吸力式沉箱基础,平面应变与三维情况下基础的破坏包络面形状有较大差异,分析基础稳定性时,必须考虑其三维效应。

当然,上述结论仅是在数值模拟情况下得到的,尚有待于模型试验或工程实测数据的进一步检验。

参 考 文 献

- [1] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundations[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(5): 637—655.
- [2] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loadings[J]. **Soils and Foundations**, 1999, 39(4): 19—33.
- [3] GOURVENEC S. Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading[J]. **Geotechnique**, 2008, 58(3): 177—185.
- [4] YUN G, BRANSBY M F. The horizontal-moment capacity of embedded foundations in undrained soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(5): 409—424.
- [5] BRANSBY M F, YUN G. The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading[J]. **Geotechnique**, 2009, 59(2): 115—125.
- [6] 范庆来, 宫秀滨, 栾茂田. 倾斜与偏心荷载作用下裙板式基础破坏包络面研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(增刊 2): 43—47.
FAN Qing-lai, GONG Xiu-bin, LUAN Mao-tian. Failure envelope of skirted foundation under inclined loading and eccentric loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 43—47.
- [7] 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): 1054—1059.
LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, YANG Qing. Numerical analysis of ultimate pull-out resistance of suction caisson in inhomogeneous soft foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 1054—1059.
- [8] 范庆来, 栾茂田. V-H-T 荷载空间内海上风机桶形基础破坏包络面特性分析[J]. **土木工程学报**, 2010, 43(4): 113—118.
FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian. Failure envelopes of bucket foundation for offshore wind turbines in V-H-T loading space[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, 43(4): 113—118.
- [9] GOURVENEC S, RANDOLPH M F. Effect of strength non-homogeneity on the shape of failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(6): 575—586.
- [10] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. The effect of skirted foundation shape on response to combined V-M-H loadings[J]. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, 1999, 9(3): 214—218.