

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3577-07

力矩与水平荷载联合作用下 裙板式基础破坏包络面研究

范庆来^{1,2}, 邓建俊¹, 周爱军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, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 联合采用 swipe 加载模式、固定位移比与固定荷载比加载模式, 对于裙板式浅基础在水平荷载与力矩荷载的复合加载条件下的承载性能进行比较系统的平面应变有限元分析, 主要探讨了裙板式基础埋深、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, 揭示了地基在水平和力矩荷载的不同组合条件下的失稳破坏机制。同时, 对于两种 swipe 加载模式的有效性进行了比较。计算结果表明: 对于非均质土, 当裙板式基础埋深与宽度之比大于 0.3 时, 破坏包络面产生正方向倾斜; 当埋深与宽度之比小于 0.3 时, 基础的破坏包络面出现负方向倾斜。而在均质土中, 基础的破坏包络面没有出现负方向倾斜。

关 键 词: 裙板式基础; 破坏包络面; 复合加载; 有限元分析; 非均质

中图分类号: TU 475

文献标识码: A

Failure envelope of skirted foundation subjected to moment and lateral load combined loading

FAN Qing-lai^{1,2}, DENG Jian-jun¹, ZHOU Ai-jun¹, 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)

Abstract: Combined with swipe loading method, fixed displacement ratio method and fixed load ratio method, the bearing capacity of shallow skirted foundations subjected to horizontal and moment combined loadings is explored through plane strain finite element numerical studies. The effect of embedment and soil strength nonhomogeneity on the failure envelope of skirted foundations is investigated; and the soil deformation mechanism under various combinations of horizontal and moment loads is shown. The validity of two types of swipe loading methods is compared. From the results, it is indicated that for nonhomogeneous soil, under the condition that the ratio of embedment depth to width is larger than 0.3, the failure envelope of skirted foundations is positively oblique; however the failure envelope is negatively oblique when the ratio of embedment depth to width is lower than 0.3. The phenomena of negative obliquity does not occur for skirted foundation in uniform soil.

Key words: skirted foundation; failure envelope; combined loading; finite element analysis; nonhomogeneity

1 引 言

裙板式基础是一种基底下带有竖向增强板的海洋浅基础形式, 比较适宜于软土地基, 被广泛用于海上采油平台以及近海风力发电机的基础。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、力矩荷载的共同作用。在水平荷载 H 、竖向荷

载 V 和力矩 M 的复合加载条件下, 地基达到整体破坏或极限平衡状态时各个荷载分量的组合在三维荷载空间 (H, V, M) 中将形成一个外凸的曲面, 称为破坏包络面。根据基础的设计荷载组合点 (V, H, M) 与计算得到的破坏包络面的相对位置关系, 可以判断基础在 V - H - M 荷载空间内是否处于承载能力极限状态。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, 但在分析中未考虑

收稿日期: 2010-06-13

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。E-mail: luanxnmail@163.com

基础底面以上两侧土体对承载力的贡献。Bransby 和 Randolph^[2]、Gourvenec^[3]、Yun 和 Bransby^[4]通过有限元分析考察了埋深对于裙板式基础破坏包络面的影响,在计算模型中将裙板式基础简化为等埋深的实体浅埋基础,从而忽略了裙板内部土体的变形机制对基础承载力的影响。最近,Bransby 和 Yun^[5]进一步考虑了裙板式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 H - M 加载面内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,但没有阐明出现这种改变的界限值。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,均质和非均质土中裙板式基础的破坏包络面进行了系统分析,探讨了裙板式基础埋深、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。同时,通过具体算例比较了 swipe 加载模式、固定位移比与固定荷载比加载模式的适用性。

2 有限元模型

裙板式基础宽度为 B ,裙板的埋深为 D ,其厚度取 $t=0.02B$,作用在不排水饱和软黏土地基上,假定基础和地基间为完全黏结且无脱离接触现象^[1-5]。为减少有限元计算过程中地基模型的边界效应影响,地基侧向宽度取 $10B$,深度取 $3B$ 。 $D/B=0.5$ 的有限元数值计算模型如图 1 所示。采用二阶 8 节点缩减积分单元,在浅基础附近的局部区域加密网格。在计算中不考虑浅基础本身的变形,因此,采用解析刚体单元模拟。

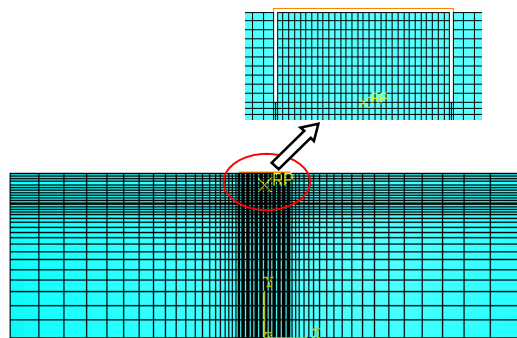


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element mesh

不排水条件下,饱和软黏土服从基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型。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,基础的宽度取 10 m ,土体变形模量 $E = 400S_u$,泊松比 $\nu = 0.49$ 。假定非均质土为正常固结土, $S_{um} = 0$, $k = 1.2 \text{ kPa/m}$,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。

为了得到复合加载条件下基础的破坏包络面,一般需要进行若干次数值加载试验。其中,swipe 加载方法最早由 Tan^[6]提出并应用于离心机模型试验中,该方法在 V - H 和 V - M 加载空间内比较适用,但在 H - M 加载空间内不能搜索到基础的最大弯矩 M_{max} 。为了克服这一弊端,在 Tan 的方法基础上,Bransby 与 Randolph^[1]、Gourvenec 与 Randolph^[7]分别提出了两种不同的 swipe 加载方法,在本文中分别简称为 BRswipe 和 GRswipe 加载方法。

BRswipe 加载方法的试验过程包括两个加载步骤:①从初始状态开始,约束基础的水平位移,同时施加转角位移 θ 直至作用在浅基础上的力矩反力荷载 M 达到最大值 M_{max} ;②保持转角位移 θ 不变而沿水平方向施加位移 h ,直到作用在基础上的水平反力 H 不随位移 h 的增加而改变,第 2 步中所形成的加载轨迹可以近似地作为 H - M 荷载平面上的破坏包络线,当施加的水平位移为正时,得到 HM 象限的包络线,而施加负向水平位移时,则得到 $-HM$ 象限的包络线。

GRswipe 加载方法在搜索 HM 象限的包络线时,加载过程与 Bransby 和 Randolph 完全一致。但在搜索 $-HM$ 象限包络线时,则采用如下加载过程:①从初始状态开始,施加转角位移 θ ,直至作用在基础上的力矩反力荷载 M 达到极限值 M_{ult} ;②保持转角位移 θ 不变,施加负向水平位移 h ,直到作用在基础上的水平反力 H 不再改变,则第 2 步中所形成的加载轨迹可近似作为 $-HM$ 象限的破坏包络线。

固定位移比加载方法^[8]由 Bransby 和 Randolph 建议,取两个方向的位移增量之比 $dh/(Bd\theta)$ 为常数进行位移控制加载,直到相对应的荷载分量 H 和 M 达到极限值,此时加载路径收敛于包络面上的某点。通过多次固定位移比加载试验,可得到包络面上的一系列控制点。

最近,Yun 和 Bransby^[4]又提出了一种固定荷载比加载方法。该方法是通过在基础中轴线上与裙板底部垂直距离为 l 的某点施加水平位移,直至地基

达到极限平衡状态, 这样加载试验沿着 $M/(HB) = l/B$ 的路径达到包络面上的某点。通过改变位移施加点的距离 l , 可得到包络面上的若干控制点, 从而来拟合完整的破坏包络面。若位移施加点高于裙板底部, 可获得 HM 象限的包络线, 位移施加点低于裙底时, 则可得到 $-HM$ 象限的包络线。

3 不同加载方法的比较

对于均质和非均质土中埋深与宽度之比 $D/B = 0.1$ 、 0.2 、 0.3 、 0.5 、 0.7 和 1.0 的基础分别进行了数值模拟。这里以非均质土中 $D/B = 0.2$ 、 1.0 两种情况为例, 说明不同加载方法的适用性。

一般来讲, 固定位移比和固定荷载比加载路径

的终止点位于真实的破坏包络面上^[1-4]。而通过图 2 可以看到, BRswipe 和 GRswipe 加载模式得到的加载轨迹比真实的破坏包络面偏小。当 $D/B = 0.2$ 时, 包络面的最大弯矩点 $M_{\max}$ 出现在 $-HM$ 象限, 此时 $-HM$ BRswipe 加载轨迹明显优于 $-HM$ GRswipe 加载路径, 而更加趋近于真实包络面。当 $D/B = 1.0$ 时, 包络面最大弯矩点位于 HM 象限, $-HM$ BRswipe 加载路径距离真实包络面的偏差相对较大, 在这种情况下, $-HM$ GRswipe 加载试验方法比较合理。因此, 本文采用 swipe 加载方法得到 $H-M$ 平面上的破坏轨迹的大概形式, 在此基础上再利用若干次固定位移比或固定荷载比加载得到包络面上的控制点, 进而拟合数据得到一个完整的包络面。

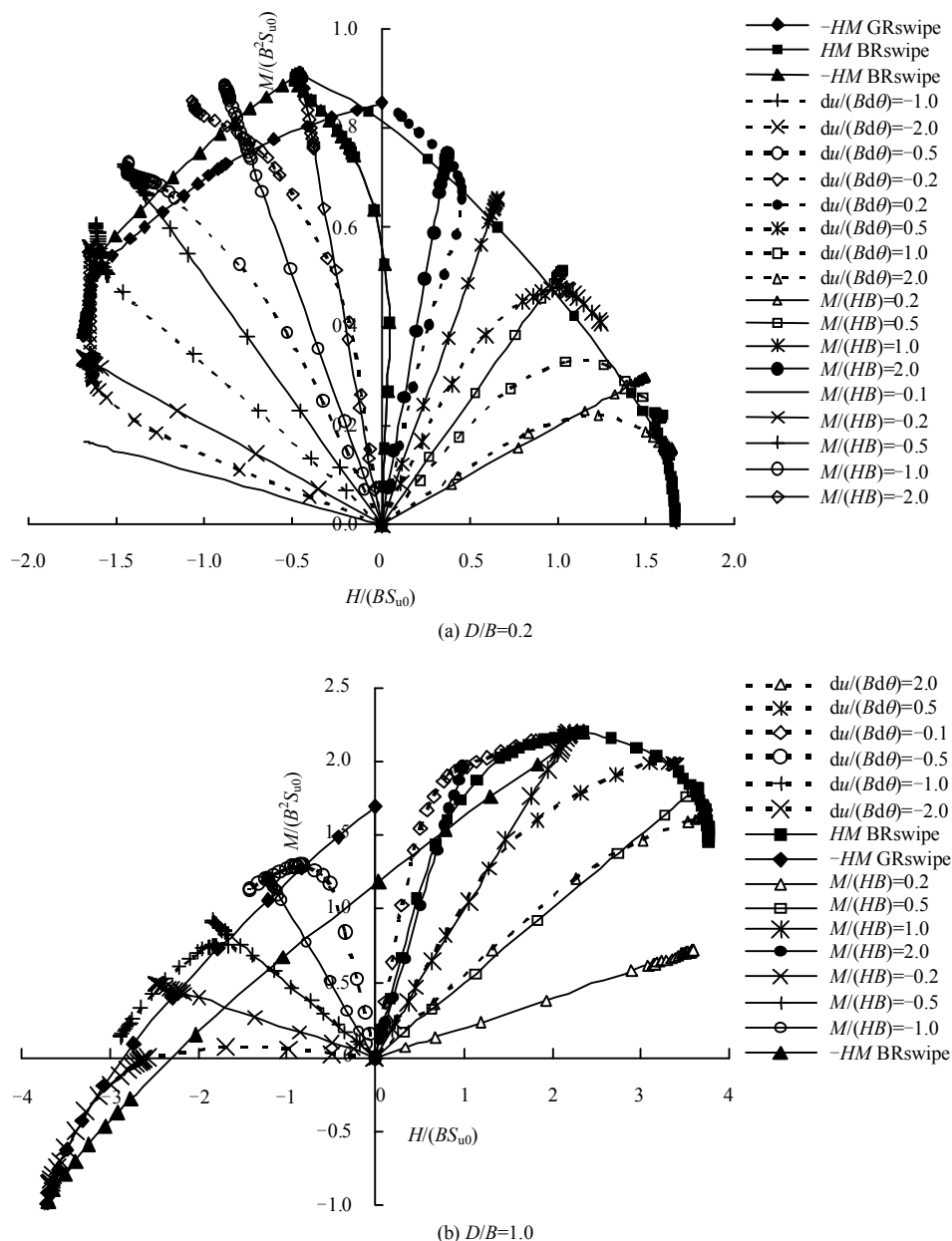


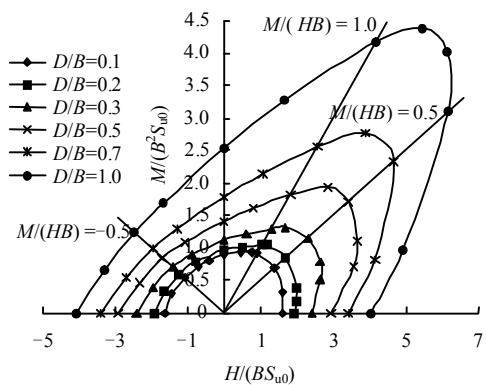
图 2 不同加载方法之间的比较

Fig.2 Comparison of loading test methods

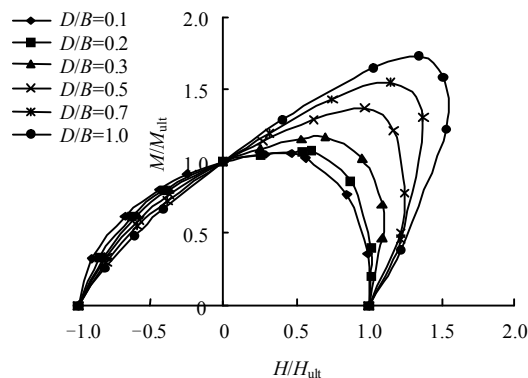
4 计算结果

4.1 均质土中基础的破坏包络面特性

图 3(a)、3(b)分别代表均质土中裙板式基础破坏包络面的大小与形状。由图 3(a)可以看到,破坏包络面的面积大小随着埋深与宽度之比 D/B 的增加而增大,从而说明裙板式基础的承载能力在不断提高。如图 3(b)所示,基础的破坏包络面形状都表现出正方向倾斜,最大弯矩点 $M_{\max}$ 不是水平荷载 $H=0$ 时的极限弯矩 M_{ult} ,而是出现在第 1 象限 $H>0$ 的某点。同时,最大水平荷载 $H_{\max}$ 不是弯矩 $M=0$ 时的极限水平荷载 H_{ult} ,也是出现在第 1 象限 $M>0$ 的某点,这种情况在 $D/B>0.2$ 时比较明显,而且倾斜程度随着 D/B 的增大而增大。



(a) 无量纲化包络面



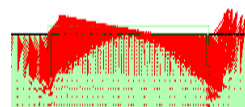
(b) 归一化包络面

图 3 均质土中基础的破坏包络面

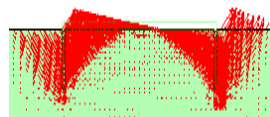
Fig.3 Failure envelopes of skirted foundation in uniform soil

根据 Bransby 和 Yun 的研究^[5],当裙板式基础的埋深与宽度之比 $D/B=0.2$ 时,在复合加载条件下其地基土体将出现内部 Hansen 破坏模式,而 $D/B=1.0$ 时则产生楔体破坏形式。通过图 4 可以看到,在复合加载 $M/(HB)=0.5$ 情况下,随着埋深

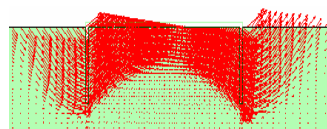
与宽度之比 D/B 的增加,裙板式基础的失稳破坏机制由内部 Hansen 模式逐步转变成为楔体失稳模式,其分界值大约在 $D/B=0.7$ 。



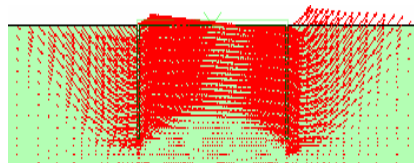
(a) $D/B=0.1$



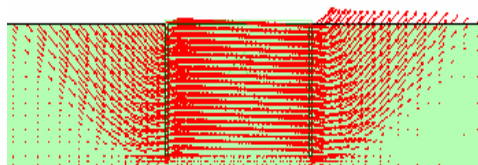
(b) $D/B=0.2$



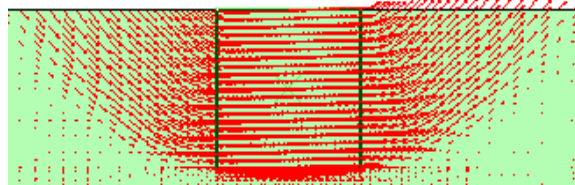
(c) $D/B=0.3$



(d) $D/B=0.5$



(e) $D/B=0.7$

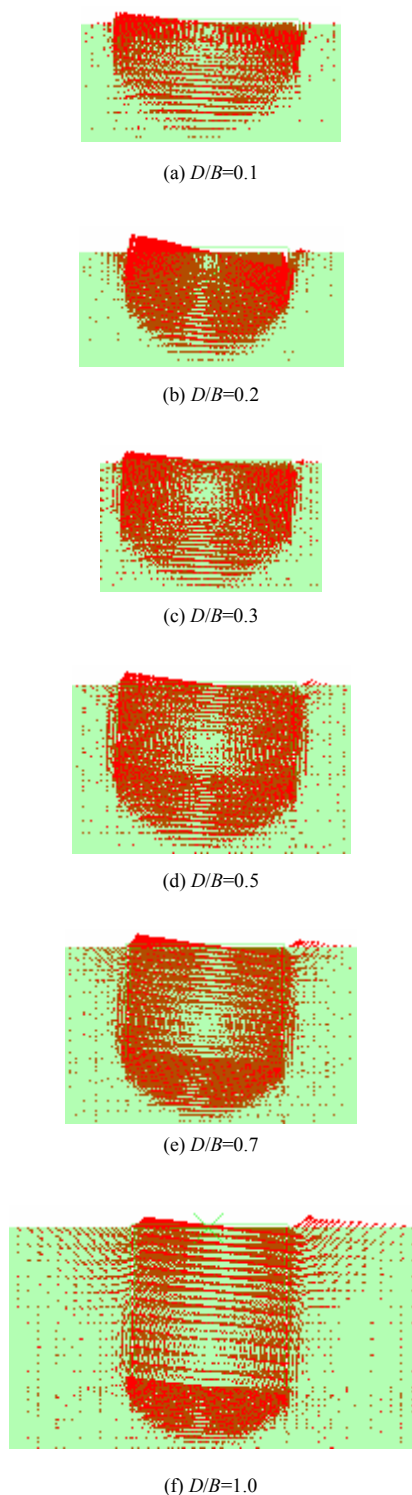


(f) $D/B=1.0$

图 4 均质土中基础的失稳机制($M/(HB)=0.5$)

Fig.4 Failure mechanisms of skirted foundation in uniform soil under $M/(HB)=0.5$

在复合加载 $M/(HB)=1.0$ 情况下,随着埋深与宽度之比 D/B 的增加,裙板式基础的失稳破坏机制由勺形模式逐步转变成为勺形-楔体失稳模式,如图 5 所示。

图 5 均质土中基础的失稳机制($M/(HB) = 1.0$)Fig.5 Failure mechanisms of skirted foundation in uniform soil under $M/(HB) = 1.0$

4.2 非均质土中基础的破坏包络面特性

从图 6 可以看到, 对于非均质土, 当裙板式基础埋深与宽度之比大于 0.3 时, 破坏包络面产生正方向倾斜。当埋深与宽度之比小于 0.3 时, 基础的破坏包络面出现负方向倾斜, 此时最大弯矩点 $M_{\max}$ 出现在第 2 象限 $H < 0$ 的某点, 最大水平荷载 $H_{\max}$

出现在第 2 象限 $M > 0$ 的区域。而当 $D/B = 0.3$ 时, 包络面基本上关于 M 轴对称, 其最大弯矩 $M_{\max}$ 与水平荷载 $H = 0$ 时的极限弯矩 M_{ult} 在数值上相等。这是因为在 $D/B = 0.3$ 时, 裙板式基础在最大弯矩 $M_{\max}$ 和极限弯矩 M_{ult} 两种状态下的失稳模式非常吻合, 如图 7 所示。

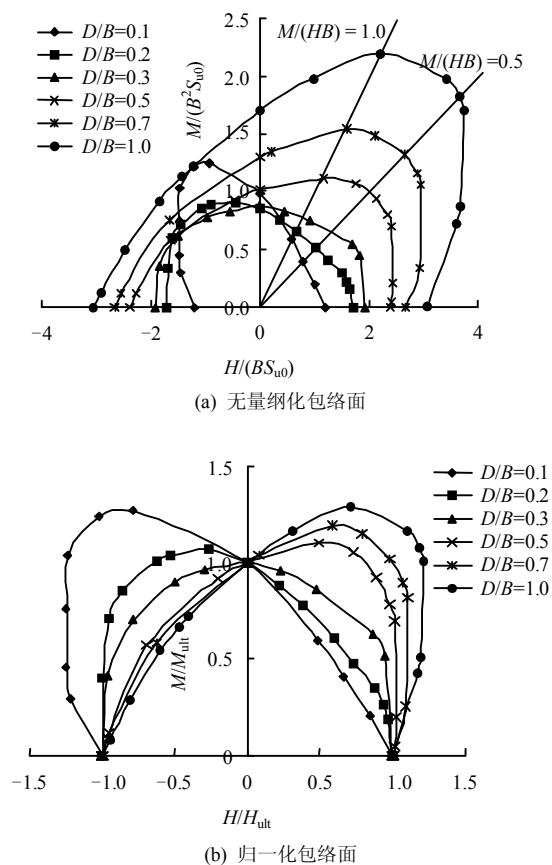
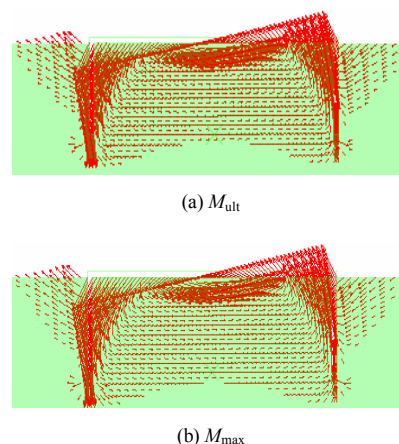


图 6 非均质土中基础的破坏包络面

Fig.6 Failure envelopes of skirted foundation in nonuniform soil

图 7 $D/B=0.3$ 的裙板式基础在极限弯矩和最大弯矩状态下的失稳模式间的比较Fig.7 Comparison of failure mechanisms of skirted foundation with $D/B=0.3$ under ultimate moment and maximum moment

通过图 8 看到, 在复合加载 $M/(HB)=0.5$ 情况下, 非均质土中裙板式基础的失稳机制在 $D/B=0.1$ 时为内部双勺形模式, 随着埋深与宽度之比 D/B 的增加, 逐渐由内部 Hansen 模式转变成为楔体失稳模式。而在复合加载 $M/(HB)=1.0$ 情况下, 随着埋深与宽度之比 D/B 由 0.1 增加到 0.3, 裙板式基础的失稳破坏机制由内部双勺形模式逐步转变成为内部 Hansen 失稳模式, 而当 D/B 由 0.3 增加到 1.0 时, 基础的失稳破坏机制则逐步转变成为楔体失稳模式, 如图 9 所示。因此, 即使在相同荷载分量联合作用下, 均质土和非均质土中基础的失稳机制也是不同的, 这也在一定程度上揭示了均质土和非均质土中裙板式基础破坏包络面形状出现较大差异的原因。

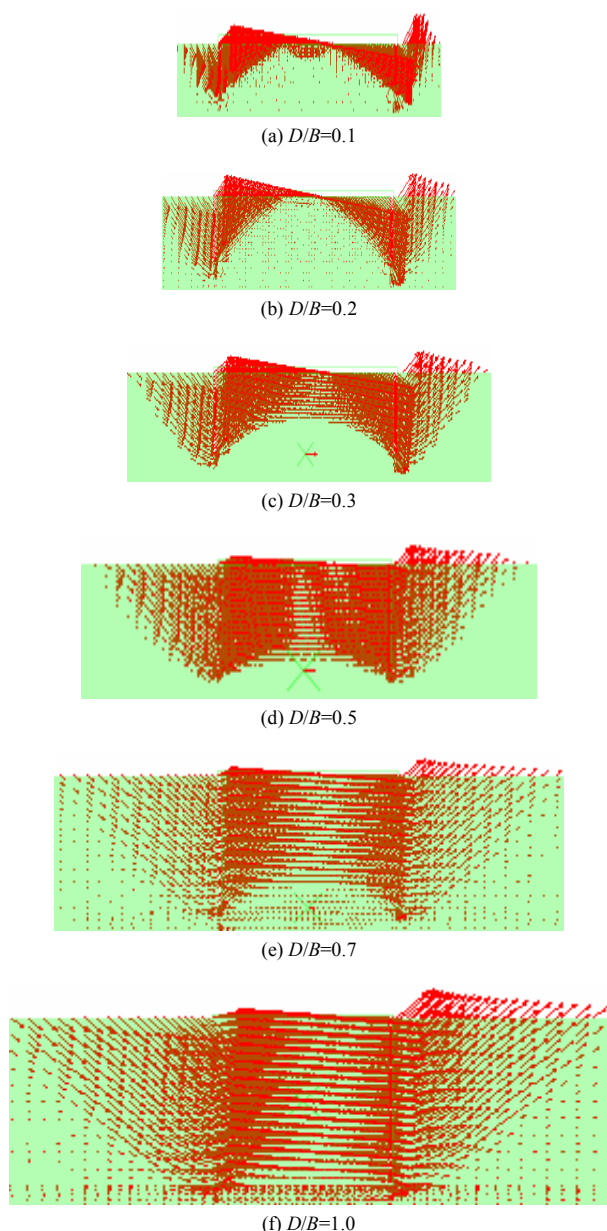


图 8 非均质土中基础的失稳机制($M/(HB)=0.5$)
Fig.8 Failure mechanisms of skirted foundation in nonuniform soil under $M/(HB)=0.5$

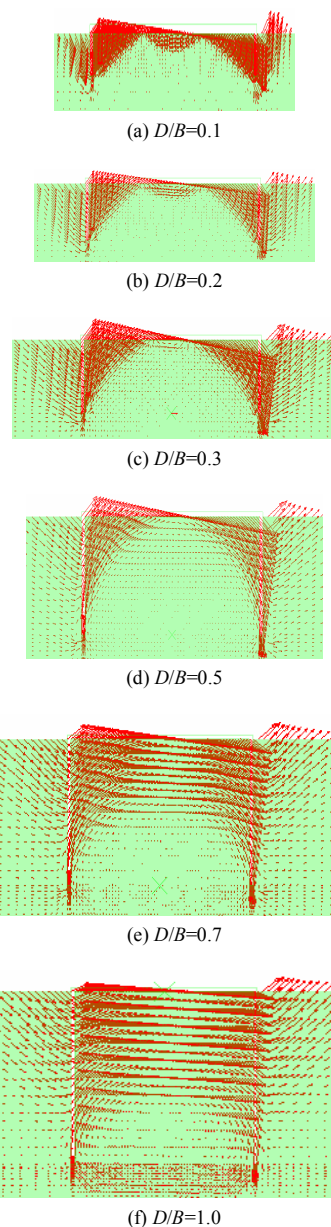


图 9 非均质土中基础的失稳机制($M/(HB)=1.0$)
Fig.9 Failure mechanisms of skirted foundation in nonuniform soil under $M/(HB)=1.0$

另外, 从图 4、5、8、9 可知, 在复合加载条件下, 裙板式基础内部土体也产生变形破坏, 从而其失稳模式要比等埋深的实体浅基础更加复杂, 因此, 必须考虑裙板内部土体的变形机制对于裙板式基础承载力的影响。

通过比较图 3、6 可知, 非均质土中裙板式基础的破坏包络面更加复杂, 而已有的包络面方程只适合于描述正倾斜特性^[1,7,9], 这将明显高估埋深与宽度之比小于 0.3 的裙板式基础在正向水平荷载与弯矩联合作用下的承载力, 从而导致基础设计偏于不安全, 因此, 必须提出新的破坏包络面函数形式, 以考虑 $D/B < 0.3$ 时, 基础破坏包络面的负倾斜特性。

5 结 论

(1) 对于非均质土，当裙板式基础埋深与宽度之比大于 0.3 时，破坏包络面产生正方向倾斜，当埋深与宽度之比小于 0.3 时，基础的破坏包络面出现负方向倾斜。而在均质土中，基础的破坏包络面没有出现负方向倾斜。随着埋深与宽度之比的增加， H - M 加载空间内的破坏包络面逐渐发生顺时针旋转。

(2) 在均质土中，破坏包络面的面积大小随着埋深与宽度之比 D/B 的增加而增大，而在非均质土中则不一定，这从图 3(a) 和图 6(a) 可以看到。

(3) 已有的包络面方程将明显高估埋深较浅的裙板式基础在正向水平荷载与弯矩联合作用下的承载力，从而导致基础设计偏于不安全。

(4) 当破坏包络面出现负倾斜时， $-HM$ BRswipe 加载轨迹明显优于 $-HM$ GRswipe 加载路径，而当包络面出现正倾斜时， $-HM$ GRswipe 加载试验路径比较合理。

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 effects of embedment on the undrained response of caisson 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] TAN F S. Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand[D]. Cambridge, UK: Cambridge University, 1990.
- [7] 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.
- [8] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Shallow foundations subjected to combined loadings[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997: 1947—1952.
- [9] TAIEBAT H A, CARTER J P. Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(4): 409—418.

(接第 3576 页)

《岩土力学》2011 年第 9 期被 EI 收录论文 (52 篇, 收录率 100 %)

序号	论文题名	作者	页码
26	大理岩单轴压缩时滞性破坏的试验研究	杨艳霜, 周 辉, 张传庆, 等	2714—2720
27	聚丙烯纤维加筋灰土的三轴强度特性	施利国, 张孟喜, 曹 鹏	2721—2728
28	干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究	张家俊, 龚壁卫, 胡 波, 等	2729—2734
29	鄂西北山区边(滑)坡综合分类探讨	任伟中, 范建海, 孔令伟, 等	2735—2740
30	双向增强复合地基沉降计算方法研究	赵明华, 张 玲, 赵 衡	2741—2746
31	极浅埋连拱隧道中隔墙顶部岩体塌方演化过程分析	李英勇, 冯现大, 李术才, 等	2747—2752
32	煤巷顶板软弱夹层层位对锚杆支护结构稳定性影响	张 农, 李桂臣, 阚甲广	2753—2758
33	大跨度高边墙地下洞室分层间隔施工方法	刘保国, 徐干成	2759—2764
34	基于声波测井资料的地应力分布研究——以饶阳凹陷任北奥陶系潜山为例	李 静, 查 明, 刘 震	2765—2770
35	不对称双连拱海底隧道施工引起的地层变形分析	王 凯, 张成平, 王梦恕	2771—2777
36	典型留巷顶板条件下巷旁充填体支护阻力分析	阚甲广, 张 农, 李宝玉, 等	2778—2784
37	覆盖型岩溶塌陷的空间预测与评价	刘秀敏, 陈从新, 沈 强, 等	2785—2790
38	井喷失控条件下盐岩储库稳定性分析	马林建, 刘新宇, 许宏发, 等	2791—2797
39	基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究	宋 琨, 晏鄂川, 朱大鹏, 等	2798—2802
40	下穿高速公路浅埋大跨度黄土隧道施工措施研究	李 健, 谭忠盛, 喻 渝, 等	2803—2809
41	饱和孔隙介质中非均匀震电平面波	崔志文, 高文阳, 张 言, 等	2810—2814
42	黄泛区路基强夯时超孔隙水压力变化规律试验研究	李晓静, 李术才, 姚 凯, 等	2815—2820
43	天津厚地层超长钻孔灌注桩单桩承载特性研究	柯 洪, 吴 翔, 王继华, 等	2821—2826
44	爆炸离心模型试验研究进展与展望	马立秋, 张建民, 张 武	2827—2833
45	地层建模中钻井与地质平面数据间偏差检测及修正	安聪荣, 刘 展, 李 曼	2834—2838
46	软黏土中预钻孔沉桩引起的土体隆起分析	周建武, 楼晓明	2839—2844
47	超大断面铁路隧道施工断面综合荷载释放过程研究	李术才, 赵 岩, 李利平, 等	2845—2851
48	颗粒材料数值样本的坐标排序生成技术	楚锡华	2852—2855
49	基于 FLAC ^{3D} 的超长大直径钢管桩竖向承载特性模拟	张明远, 黎生南, 彭文韬, 等	2856—2860
50	随机裂隙岩体渗流-应力耦合分析的块体单元法	殷德胜, 汪卫明, 陈胜宏	2861—2866
51	节理网络模拟的程序实现及其在地下洞室中的动态响应分析	贾 超, 王志鹏, 朱维申	2867—2872
52	电阻率层析成像法探测滑坡面正演模拟与反演成像研究	聂利超, 李术才, 刘 斌, 等	2873—2880