

文章编号: 1000-7598 (2013) 12-3641-05

非共面复合加载条件下桶形基础稳定性研究

范庆来¹, 赵海涛², 郑 静³, 于 晓¹

(1. 鲁东大学 岩土工程重点实验室, 山东 烟台 264025; 2. 国家海洋局 第二海洋研究所, 杭州 310058;
3. 鲁东大学 交通学院, 山东 烟台 264025)

摘 要: 采用荷载-位移联合搜索方法, 对于饱和软黏土地基上裙板式桶形基础在水平荷载 H 、力矩 M 与扭矩 T 的非共面复合加载条件下的稳定性进行了比较系统的三维有限元分析, 主要探讨了在不同荷载空间内桶形基础的破坏包络轨迹。在分析中, 地基土服从基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构关系。计算结果表明, 与传统共面复合加载情况相比, 非共面复合加载条件下桶形基础的破坏包络面形状有较大差异。非共面复合加载情况下, 包络面形状不依赖于基础埋深比, 可用简单的圆或椭圆方程进行描述。根据有限元计算结果, 将已有的三自由度破坏包络面方程扩展到六自由度复合加载空间内, 进而初步建议了一个六自由度破坏包络面方程, 并对于实际工程中常用的桶形基础埋深比, 给出了方程中偏心率参数取值的确定方法。该方程可用来合理评价复杂荷载条件下软黏土地基上桶形基础承载力。

关 键 词: 裙板式桶形基础; 软黏土; 破坏包络面; 六自由度复合加载; 稳定性

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

Stability of bucket foundations under non-coplanar combined loading

FAN Qing-lai¹, ZHAO Hai-tao², ZHENG Jing³, YU Xiao¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China; 2. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Hangzhou, 310058, China; 3. School of Transportation, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

Abstract: Using combined load-displacement searching method, the stability of skirted bucket foundations in saturated soft clay subjected to horizontal load (H), moment (M) and torque (T) non-coplanar combined loading is studied through three-dimensional finite element numerical analysis. The soft soil is assumed to be undrained and obeys elasto-perfectly plastic constitutive relationship following the Tresca failure criterion. The failure locus of bucket foundations in various loading spaces is investigated. The results show that the shape of failure envelopes of bucket foundations subjected to non-coplanar combined loading varies considerably from that under planar combined loading. Under non-coplanar combined loading, the shape of failure envelope does not depend on the aspect ratio of bucket foundations, which may be approximated as a circle or ellipse in normalized load space. Based on finite element analysis, the existing equation of failure envelope in three-degree-of-freedom loading condition is extended to the six-degree-of-freedom case, then an equation of failure envelope involving all six-degrees-of-freedom is suggested, which can be used to evaluate the bearing capacity of bucket foundations in soft soil under combined loading condition. Values of the eccentricity parameter in the proposed equation are also presented for a range of practical embedment ratios.

Key words: skirted bucket foundation; soft clay; failure envelope; six-degree-of-freedom combined loading; stability

1 前 言

桶形基础产生于 20 世纪 90 年代的挪威, 由挪威国家石油公司研制成功, 并在世界各国海上平台工程中得到推广应用。桶形基础是一种带裙的圆板基础形式, 也称为裙板式基础, 由于其具有减少工

程量、节省投资、缩短施工时间等优点, 在某些领域正在逐渐代替重力式基础和桩基。日本等一些国家进行了将其作为深水桥梁基础适用性的研讨, 并于 2005 年发布了吸力式桶形基础的设计与施工工法^[1]。在海洋环境下, 基础除了承受上部结构物的竖向自重荷载 V 以外, 一般还要遭受波浪、暴风等

收稿日期: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50909048, No. 51079018); 山东省自然科学基金资助项目 (No. ZR2010EQ036); 山东省高等学校科技计划项目 (No. J12LG01)。

第一作者简介: 范庆来, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事海洋岩土工程基本理论、数值计算与模型试验, 滨海地区软基处理及原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: fanqinglai@ldu.edu.cn

所引起的水平荷载 H 、弯矩 M 与扭矩荷载 T 。对于这种复合加载模式下的地基承载力问题,传统的解决方法一般是在 Terzaghi 竖向承载力公式基础上,通过引入荷载倾斜系数考虑水平荷载对竖向承载力的降低作用,引入 Meyerhoff 有效宽度假定考虑荷载偏心影响,但这种传统的计算方法不适于含有较大水平荷载和力矩的情况^[2]。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。破坏包络面理论认为,在广义加载空间内存在一个外凸曲面,该曲面不依赖于荷载施加路径,由引起基础失稳时的各种荷载分量组合而成,称之为破坏包络面。将设计荷载与破坏包络面方程进行对比,若基础可能承受的荷载组合点处于包络面内部,则基础在荷载空间内是稳定的,基础设计是合理的,反之,基础将发生失稳,必须重新进行设计。施晓春等^[3]通过模型试验和数值计算等手段对于水平荷载作用下桶形基础稳定性进行了系统分析,武科等^[4]对于扭矩单独作用下软黏土地基上桶形基础的承载力进行了分析,得到了桶形基础在扭矩荷载极限状态时的破坏机制,但这些工作主要集中在共面复合加载情况,如图 1(a)所示。实际上作用在桶形基础上的荷载可以分解为 6 个分量,分别为沿着坐标轴方向的 3 个力分量 (V 、 H_2 、 H_3) 以及绕坐标轴转动的 3 个力矩分量 (T 、 M_2 、 M_3), 见图 1(b)。

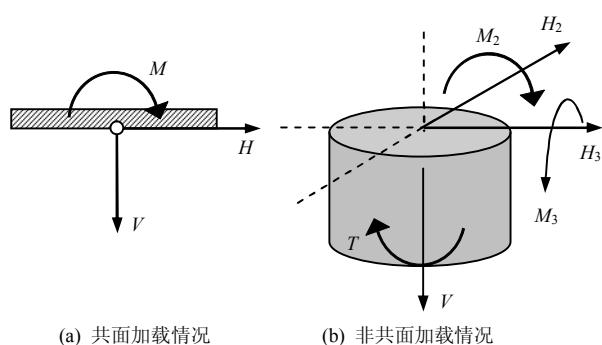


图 1 共面复合加载与 6 个自由度复合加载模式间比较
Fig.1 Comparison between planar combined loading and six-degree-of-freedom combined loading

针对这种非共面复合加载情况,范庆来等^[5-6]利用复合加载数值试验方法分别考察了桶形基础在 V - H - M 和 V - H - T 荷载空间内的稳定性,指出 V - H - T 荷载空间内的破坏包络面关于 T 轴、 H 轴对称,这与共面 V - H - M 荷载空间内的包络面特性不同。Houlsby 等^[7]、Zhang 等^[8]分别对于桶形基础、管桩基础进行了原位试验与离心机模型试验,揭示了基础在包含扭矩荷载分量在内的非共面复合加载作用

下的失稳机制。因此,本文基于大型有限元软件 ABAQUS,对于均质软基上桶形基础在非共面复合加载条件下的承载力进行了数值模拟,初步得到了一个破坏包络面方程,可用来评价复杂荷载条件下桶形基础稳定性。

2 有限元模型

桶形基础直径为 $B = 10$ m,埋深为 D ,底面积 $A = \pi B^2 / 4$,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^[4-7]。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 $3B$ 。 $D/B = 0.2$ 的有限元数值计算模型如图 2 所示。采用 2 阶 20 节点缩减积分单元,在桶形基础附近的局部区域加密网格。为了与已有结果^[4-7]进行比较,在计算中不考虑桶形基础本身的变形,因此,采用解析刚体单元模拟。静力不排水条件下,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 $S_u = 10$ kPa,土体变形模量 $E = 400S_u$,泊松比 $\nu = 0.49$ 。为了得到桶形基础的破坏包络面,一般采用荷载-位移联合搜索方法^[5],即联合进行 swipe 加载和若干次固定位移比加载试验。swipe 加载与固定位移比加载步骤详见文献^[5],这里不再赘述。

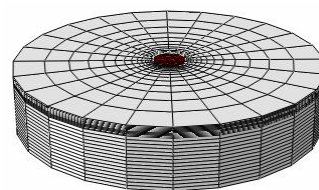


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite element mesh

3 H_2 - M_2 复合加载

常规的共面复合 H - M 加载在六维自由度加载情况下,实际上相当于 H_3 - M_2 或者 H_2 - M_3 复合加载,而没有考虑 H_2 - M_2 或者 H_3 - M_3 非共面复合加载。从荷载空间对称性来看, H_3 - M_3 复合加载试验得到的破坏包络面与 H_2 - M_2 复合加载完全一致,因此,本文仅考虑 H_2 - M_2 复合加载情况。图 3 给出了 $D/B = 0.2$ 桶形基础包络面的加载路径,进行了 2 次 swipe 加载和 4 次固定位移比加载试验,进而拟合数据得到最终的破坏包络面,其中 u_2 、 θ_2 为固定位移比加载试验中沿着 H_2 、 M_2 方向所施加的位移分量; M_2H_2 swipe 和 H_2M_2 swipe 加载代表了不同的荷载施加次序^[5]。其他情况下的破坏包络面也可以通过类似的

数值试验方法得到。对 $D/B=0.2$ 和 1.0 两种情况分别进行了研究, 得到了桶形基础在 H_2 - M_2 荷载平面上的破坏包络面, 如图 4 所示。图 4(a)中的无量纲化包络面可以直接反映基础复合加载承载力的大小, 图 4(b)中的归一化包络面主要用来反映破坏包络面的形状, 当采用相应的水平荷载单独作用下的承载力 H_{ult} 、弯矩单独作用下的承载力 M_{ult} 归一化后, 包络面形状非常一致, 且可采用简单的椭圆函数方程进行表达。

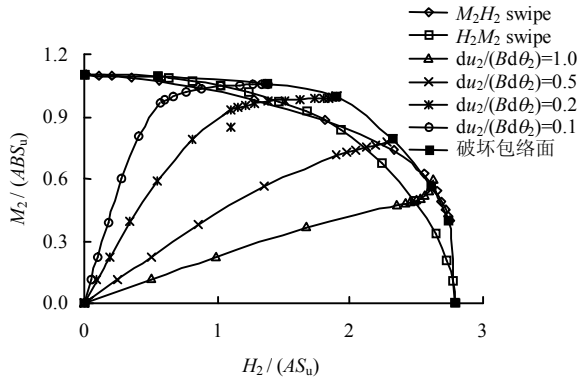
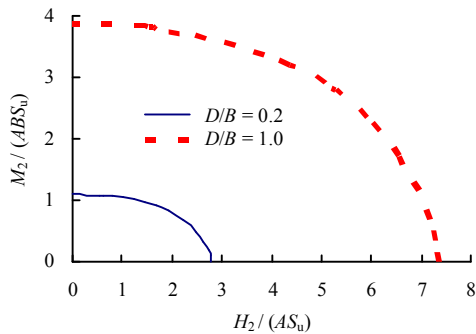
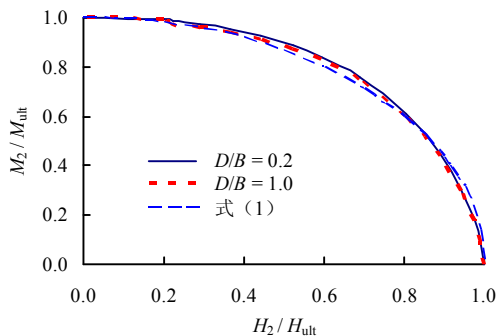


图 3 复合加载路径

Fig.3 Path of combined loading



(a) 无量纲化包络面



(b) 归一化包络面

图 4 桶形基础 H_2 - M_2 破坏包络面Fig.4 H_2 - M_2 failure envelopes of bucket foundations

通过图 4(b)与共面 H - M 复合加载得到的包络面形状^[6]进行对比, 可以看到, H_2 - M_2 包络面形状几乎不依赖于基础埋深与直径之比 D/B , 并且关于纵轴对称, 而这与共面 H - M 包络面特性完全不同。

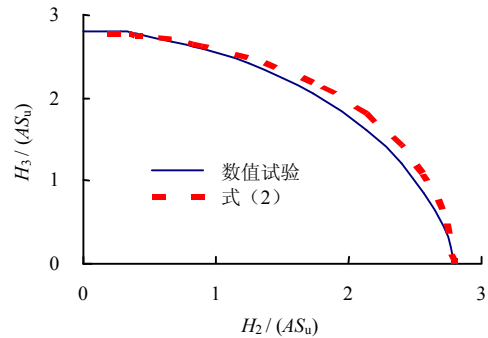
$$\left(\frac{M_2}{M_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{H_2}{H_{ult}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

4 H_2 - H_3 复合加载

由于考虑地基为各向同性均质土, 其强度与加载应力路径无关, 因此, 不考虑不同方向水平荷载加载次序对基础位移造成的影响。在这种假定前提下, 根据工程力学中力的合成定理, H_2 、 H_3 可以合成为合力 H , 而在合力 H 作用下基础的承载力实际上就是基础水平承载力 H_{ult} , 因此, 桶形基础在 H_2 - H_3 荷载平面上的破坏包络面可采用圆函数方程描述:

$$\left(\frac{H_2}{H_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{H_3}{H_{ult}}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

对 $D/B=0.2$ 基础进行数值加载试验所得包络面形状验证了这一点, 如图 5 所示。同理, M_2 - M_3 荷载平面上的破坏包络面也可采用类似圆函数方程表达。

图 5 桶形基础 H_2 - H_3 破坏包络面Fig.5 H_2 - H_3 failure envelopes of bucket foundations

5 破坏包络面方程

Bransby 等^[2]、Taieba 等^[9]分别对于黏土地基上条形基础和圆形基础提出了破坏包络面方程, 但在计算模型中没有显式考虑裙板, 忽略了裙板周围土体对承载力的贡献。Gourvenec 等^[10]对共面复合加载条件下裙板式基础给出了一个破坏包络面方程, 根据其 3 个自由度破坏包络面方程形式^[10], 结合范庆来等^[5-6]给出的 V - H - M 和 V - H - T 荷载空间内的破坏包络面形状, 建议破坏包络面方程为

$$\left(\frac{H_2}{H_{vult}}\right)^2 + \left(\frac{H_3}{H_{vult}}\right)^2 + \left(\frac{M_2}{M_{vult}}\right)^2 + \left(\frac{M_3}{M_{vult}}\right)^2 - 2a \frac{H_3 M_2 - H_2 M_3}{H_{vult} M_{vult}} + \left(\frac{T}{T_{vult}}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

式中: H_{vult} 、 M_{vult} 和 T_{vult} 分别为在一定竖向荷载水平 V/V_{ult} 下, 桶基所能承受的最大水平荷载、弯矩和扭矩, 可以用如下公式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} H_{\text{vult}} &= H_{\text{ult}} \left[1 - \left(\frac{V}{V_{\text{ult}}} \right)^{\frac{1}{b}} \right] \\ M_{\text{vult}} &= M_{\text{ult}} \left[1 - \left(\frac{V}{V_{\text{ult}}} \right)^{\frac{1}{c}} \right] \\ T_{\text{vult}} &= T_{\text{ult}} \left[1 - \left(\frac{V}{V_{\text{ult}}} \right)^{\frac{1}{d}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

确定式(3)需要 4 个参数, 其中 a 反映了 H_2 - M_3 或 H_3 - M_2 加载平面上包络面的偏心率, 一般 a 取 $-1 \sim 1$, 参数 a 的绝对值越高, 包络面的偏心率越大, 其值可根据式 (5) 确定, b 、 c 和 d 为拟合参数, 取值范围一般在 $0.1 \sim 0.3$ 之间^[6]。在式 (3) 中, 将竖向荷载分量 V 选取为隐变量, 是因为在实际工程中, 基础上所承受的竖向荷载分量 V 主要来自于上部结构以及基础本身的自重, 一般变化不大, 而水平分量 H 、弯矩 M 和扭矩 T 则来自于波浪、风暴等外部环境荷载, 往往变化较大, 因此, 式 (3) 可用来作为桶形基础破坏包络面方程, 据以判断桶形基础在六维自由度复合加载条件下是否稳定。当将六维自由度荷载空间退化到 3 个自由度的共面复合加载空间时, 式 (3) 变为

$$\left(\frac{H_3}{H_{\text{vult}}} \right)^2 + \left(\frac{M_2}{M_{\text{vult}}} \right)^2 - 2a \frac{H_3 M_2}{H_{\text{vult}} M_{\text{vult}}} = 1 \quad (5)$$

可以看到, 共面复合加载条件下的包络面方程只是本文所建议式 (3) 的一个特例。

为了验证方程的有效性, 首先对文献[6]中共面复合加载条件下 H_3 - M_2 荷载平面内的包络线进行了模拟。可以看到, 式 (3) 对于均质和非均质土中埋深比 D/B 在 $0.1 \sim 1.0$ 之间基础的模拟结果都较好, 从而说明采用如式 (3) 所示的包络面方程是基本可行的。

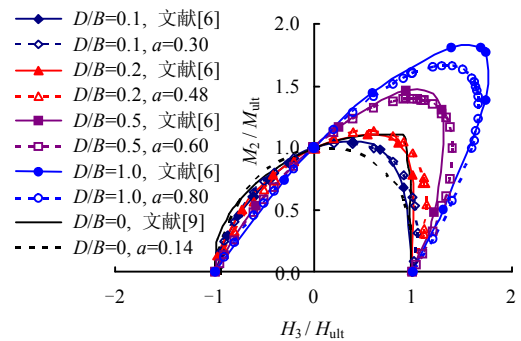
参数 a 受基础埋深比、地基土强度非均质性等因素影响, 参考 Gourvenec 等^[10]的做法, 将参数 a 表达为埋深比的函数。

对于均质土:

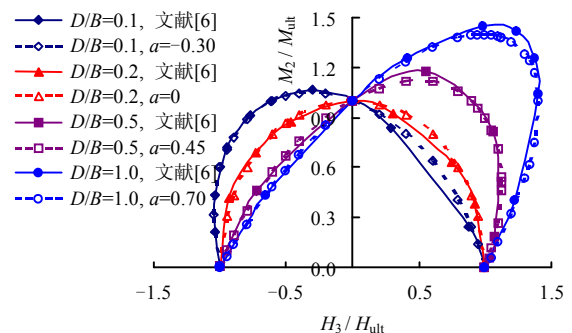
$$a = 1.57 \left(\frac{D}{B} \right)^3 - 2.98 \left(\frac{D}{B} \right)^2 + 2.07 \frac{D}{B} + 0.14 \quad (6)$$

对于正常固结非均质土:

$$a = 1.71 \left(\frac{D}{B} \right)^3 - 4.29 \left(\frac{D}{B} \right)^2 + 3.94 \frac{D}{B} - 0.64 \quad (7)$$



(a) 均质土



(b) 非均质土

图 6 不同埋深比桶形基础 H_3 - M_2 破坏包络面
Fig.6 H_3 - M_2 failure envelopes of bucket foundations under different embedment ratios

如图 7 所示, 拟合方程 (6)、(7) 与文献[10]建议的公式不同, 因为文献[10]的公式是在平面应变假设前提下得到的, 相当于忽略了桶形基础的平面形状^[6]。

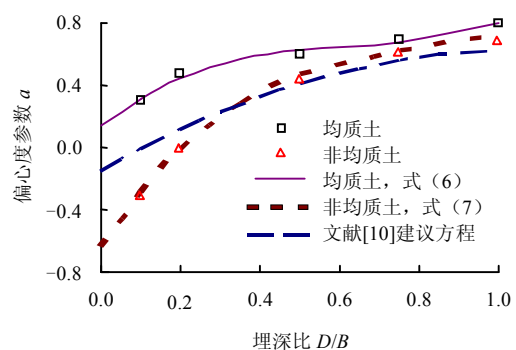


图 7 包络面方程偏心率参数与埋深比之间的关系
Fig.7 Relationships of eccentricity parameter and embedment ratios

值得注意的是, 采用式 (6) 预测 $D/B=0$ 的圆形浅基础时, 计算得到的包络面在第 2 象限与 Taiebat 等^[9]的计算结果比较吻合, 但在第 1 象限顶点附近预测结果明显偏于保守, 所以式 (6)、(7)

的适用区间应局限在工程中常用的桶形基础埋深比范围(0.1~1.0)内^[11]。

为了进一步验证式(3)在非共面复合加载空间内的合理性,采用荷载-位移联合搜索方法^[5],对均质土中 $D/B=0.2$ 和1.0两种情况下的 T - H_3 - M_2 破坏包络面进行了研究,得到了桶形基础在不同扭矩荷载水平 T/T_{ult} 下, H_3 - M_2 荷载平面上的破坏包络轨迹,如图8所示。同时采用式(3)进行预测,对于 $D/B=0.2$ 和1.0两种情况,分别取参数 a 为0.48和0.80。可以看到,在 $T/T_{ult} \leq 0.50$ 情况下,式(3)预测结果与有限元所得数据比较吻合,而在扭矩荷载水平 $T/T_{ult} > 0.50$ 时,式(3)预测结果低于有限元计算结果,但从应用角度来看,在较高的扭矩荷载水平情况下,根据式(3)进行桶形基础设计偏于安全,这在工程上是可以接受的。

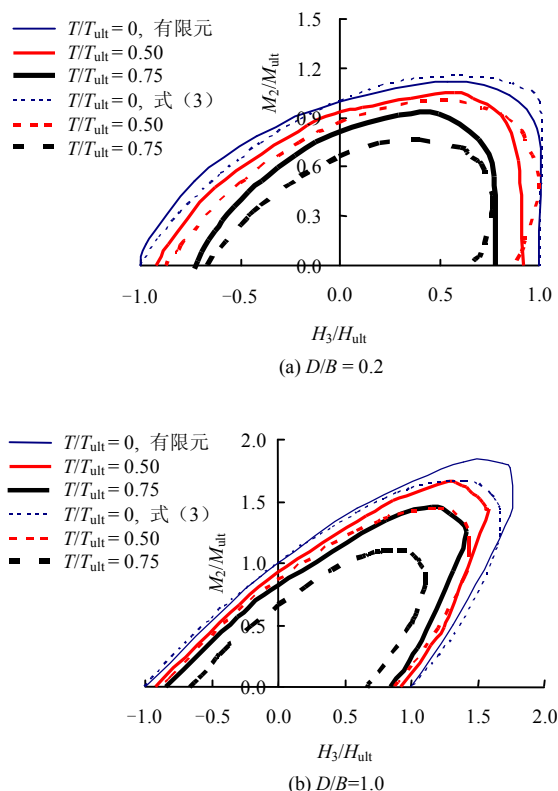


图8 不同扭矩水平下桶形基础 H_3 - M_2 破坏包络面
Fig.8 H_3 - M_2 failure envelopes of bucket foundations under various torque load levels

5 结 论

(1) 非共面复合加载情况下, H_2 - M_2 、 H_2 - H_3 包络面形状不依赖于基础埋深比,可用简单的椭圆或圆函数方程进行描述。

(2) 与传统共面复合加载情况相比,非共面复合加载条件下桶形基础的破坏包络面形状有较大差异。

(3) 根据计算结果,建议了一个六维自由度破

坏包络面方程,并对于工程中常用的桶形基础埋深比,给出了方程中参数取值的确定方法。经过初步验证,该方程可用来评价深水桶形基础在六维自由度复合加载条件下是否稳定。

参 考 文 献

- [1] 李正仁, 朱华民. 新型桥梁水中基础-负压式筒形基础[J]. 世界桥梁, 2008, (4): 8-12.
LI Zheng-ren, ZHU Hua-min. Novel deepwater foundation for bridge-suction bucket foundation[J]. *World Bridges*, 2008, (4): 8-12.
- [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] 施晓春, 龚晓南, 徐日庆. 水平荷载作用下桶形基础性状的数值分析[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 49-52.
SHI Xiao-chun, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Numerical analysis of properties of bucket foundation under horizontal forces[J]. *Chinese Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(4): 49-52.
- [4] 武科, 马明月, 范庆来, 等. 软黏土地基上吸力式桶形基础的扭剪承载力分析[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(4): 51-54.
WU Ke, MA Ming-yue, FAN Qing-lai, et al. Analysis of torsional resistance of suction bucket foundation[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2010, 26(4): 51-54.
- [5] 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.
- [6] 范庆来, 李璞晟, 倪宏革, 等. 复合加载条件下沉箱基础稳定性的三维效应[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 686-690.
FAN Qing-lai, LI Pu-sheng, NI Hong-ge, et al. Three dimensional effect on stability of suction caisson under combined loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Supp. 1): 686-690.
- [7] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(4): 287-296.
- [8] ZHANG L M, KONG L G. Centrifuge modeling of torsional response of piles in sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, (43): 500-515.
- [9] TAIEBAT H A, CARTER J P. A failure surface for circular footings on cohesive soils[J]. *Geotechnique*, 2010, 60(4): 265-273.
- [10] GOURVENEC S, BARNETT S. Undrained failure envelope for skirted foundations under general loading[J]. *Geotechnique*, 2011, 61(3): 263-270.
- [11] VILLALOBOS F A, BYRNE B W, HOULSBY G T. Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading[J]. *Applied Ocean Research*, 2010, 32(4): 414-424.