

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.010

复合加载模式下海上风机圆形浅基础亚塑性 宏单元模型

范庆来^{1,2}, 郑 静¹

(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:海上风机基础不但承受着上部结构传来的竖向荷载、风浪等引起的水平荷载与弯矩,还承受着叶片等旋转机构传来的扭矩。基于亚塑性本构理论框架,引入相应的圆形浅基础广义屈服面函数及塑性势函数,构建了一个六自由度复合加载模式下砂土地基上海上风机基础宏单元模型。为了能够合理描述循环加载条件下基础的宏观力学响应,该模型将等效粒间应变概念引入到广义力与其对应位移关系中。通过对已有模型试验结果的数值模拟,在一定程度上验证了提出的宏单元模型的合理性。

关键词:圆形浅基础;海上风机;复合加载;砂土;宏单元

中图分类号:TU471.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0059-05

A Hypoplastic Macro-Element Model for Circular Shallow Foundations of Offshore Wind Turbines Under Combined Loading

Fan Qinglai^{1, 2}, Zheng Jing¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: The foundation for offshore wind turbines is subjected to vertical loading caused by structural weight and horizontal loading and moment due to wind- or wave-induced loading. Furthermore, it sustains torque from rotor blades. Based on the framework of hypoplasticity theory, the available general yield function and plastic potential function, a macro-element model for circular shallow foundations on sands under six-degree-of-freedom combined loading has been developed. In this model, to correctly reproduce the mechanical response of offshore foundations under cyclic loading, the concept of equivalent intergranular strain is introduced into the relationship of generalized forces as well as its corresponding displacements. The performance of the proposed macro-element model is demonstrated by comparing the model predictions with available experimental data from a series of model tests.

Key words: circular shallow foundation; offshore wind turbine; combined loading; sand; macro-element

在海洋环境下,海上风机基础不但受到上部塔架结构自重等竖向荷载与上部结构传来的风浪等引起的水平荷载、弯矩,还受到叶片等旋转机构传来的扭矩荷载。最近十几年的研究工作主要集中在利用

收稿日期:2013-04-08

基金项目:国家自然科学基金(50909048);山东省自然科学基金(ZR2010EQ036);山东省高等学校科技计划(J12LG01)

作者简介:范庆来(1977),男,博士,教授,主要从事海洋岩土工程基本理论、模型试验与数值计算、滨海地区软基处理及原位测试技术等研究,(Email)ldufanqinglai@163.com。

模型试验或数值计算等手段,建立这种复合加载条件下各类海洋基础的破坏包络面^[1-3]。根据基础的设计荷载与对应破坏包络面之间的相对位置关系,可以判断基础在复合加载空间内是否处于承载力极限状态,这也是破坏包络面理论的第一个核心内容,可用来解决复合加载条件下地基稳定性问题。但是, DNV 相关规范指出^[4],为了保证风机的正常运转,基础顶部的水平位移和转角必须严格限制在一定范围。这与实际情况显然不符合,或者进行上部结构-基础-地基相互作用模拟,而这导致整个计算体系单元数量增加,尤其在三维情况下,严重降低计算效率。实际上,破坏包络面理论的另一个核心内容在于,将基础与地基耦合系统看作一个结构单元,把已有的破坏包络面作为该单元的屈服面(或破坏面),基于各种弹塑性理论及相应加载路径的模型试验,确定宏单元模型的硬化定律、流动法则及屈服面内的弹性变形规律,从而建立基础与地基耦合系统的广义力-位移关系。这样在对上部结构进行动力分析时,以一个宏单元来代替整个基础与地基耦合系统,就可以避免传统做法的弊端,这方面的研究相对较少。Nova 等^[5]、Gottardi 等^[6]分别提出了砂土地基上条形浅基础的宏单元模型。Houlsby 等^[7]、Cassidy 等^[8]提出了用于可移动式钻井平台的纺锤形桩靴基础的三自由度宏单元模型, Bienen 等^[9]基于比较系统的室内模型试验,建立了六维自由度复合加载条件下的屈服面和塑性势面函数,进一步将该模型拓展为六维自由度宏单元。这些工作都是基于经典塑性理论框架,因此像土体经典弹塑性本构关系一样,比较适用于单调静力加载情况。为了能够合理描述循环荷载条件下基础的加卸载路径及滞回圈现象, Einav 等^[10]根据热动力学原理,采用超塑性本构理论建立了刚性基础的三自由度宏单元模型, Govoni 等^[11]采用各向异性动态硬化定律构建了一个非线性宏单元,并用于土-结构动力相互作用分析。最近, Salciarini 等^[12]根据亚塑性理论建议了一个圆形浅基础宏单元模型,该模型能够比较合理模拟基础在单调荷载和循环荷载条件下的加载历史,但是这个模型没有考虑扭矩方向自由度,并且只与 Nova 等^[5]所进行的共面复合加载模型试验进行了对比验证,因此不是严格的六自由度宏单元模型。笔者在此基础上,通过引入 Bienen 等建立的屈服面和塑性势函数,对 Salciarini 等所建立的宏单元进行了改进,使之能够全面描述六自由度复合加载路径及其对应的变形历史,并与已有的模型试验结果进行对比验证。

1 宏单元模型

将基础与地基耦合系统看作一个宏单元。类似于板壳、梁等结构单元,宏单元模型是用广义力-位移之间的关系来表达的,其中广义力矢量为 $\vec{F} = \{V, H_2, H_3, Q/D, M_2/D, M_3/D\}^T$, 广义位移矢量为 $\vec{u} = \{\omega, u_2, u_3, \omega D, \theta_2 D, \theta_3 D\}^T$, 其中 D 为基础宽度或直径,如图 1 所示。

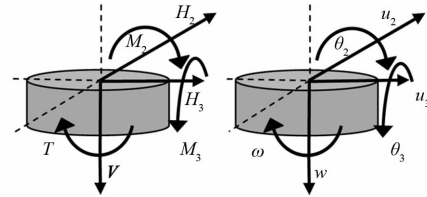


图 1 六自由度荷载空间广义力-位移关系

亚塑性理论是 Kolymbas 等在 20 世纪中后期基于理性力学框架体系发展起来的^[13],主要用来描述无黏性散粒体应力应变关系。当将这种本构理论应用于基础与地基耦合系统时,宏单元本构方程可以表达为

$$\dot{\mathbf{F}} = \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{F}, \mathbf{q}, \mathbf{d}) \quad (1)$$

式中: $\dot{\mathbf{F}}$ 和 \mathbf{d} 分别为广义力变化率张量和速度矢量, \mathbf{q} 为一组反映加载历史内部状态变量的矢量。根据 Salciarini 等的建议^[12],引入状态参量矢量为 $\vec{q} = \{V_0, \delta\}$, 其中 V_0 为竖向荷载单独作用下基础承载力, δ 为连续介质亚塑性理论中的等效粒间应变,在宏单元中可以理解为系统内蕴变形矢量。状态变量 V_0 的演化规律实际上为经典弹塑性理论中的硬化准则,可采用 Cassidy 等建议的公式^[8]确定,

$$V_0 = k_1 \omega_p \frac{1 + \omega_p/\omega_1}{1 + \omega_p/\omega_2} \quad (2a)$$

式中: ω_p 为竖向塑性位移; k_1 、 ω_1 及 ω_2 为模型参数。根据 Byrne 和 Houlsby 的实验结果^[14],在六自由度复合加载试验中,竖向承载力为广义位移 z_p 的函数,为此 Bienen 等建议了如下公式^[9]

$$V_0 = k_1 z_p \frac{1 + z_p/\omega_1}{1 + z_p/\omega_2} \quad (2b)$$

式中, z_p 为等效塑性位移,可以表达为

$$z_p = \omega_p + \sqrt{u_{2p}^2 + u_{3p}^2} + D \sqrt{\theta_{2p}^2 + \theta_{3p}^2} + D\omega_p, \quad u_{2p}, u_{3p}, \theta_{2p}, \theta_{3p} \text{ 和 } \omega_p \text{ 分别为图 1 中除竖向以外的其它方向的塑性位移分量。}$$

式(1)可以进一步表示为

$$\dot{\mathbf{F}} = \mathbf{K}(\mathbf{F}, V_0, \delta) \mathbf{d} \quad (3)$$

式中, \mathbf{K} 为切线刚度张量,其矩阵形式可以表示为

$$[\mathbf{K}] = [\rho^x m_T + (1 - \rho^x) m_R][\mathbf{L}] + [\mathbf{K}'] \quad (4)$$

若以 $\vec{\eta} = \vec{d} / \|\vec{d}\|$ 和 $\vec{\eta}_\delta = \vec{\delta} / \|\vec{\delta}\|$ 分别表示广义速度矢量和系统内蕴变形矢量的方向,则当 $\vec{\eta}_\delta \cdot \vec{\eta} > 0$ 时,

$$[K'] = \rho^\chi (1 - m_T) [L] \{ \eta_\delta \} \{ \eta_\delta \}^T + \rho^\chi \{ N \} \{ \eta_\delta \}^T \quad (5a)$$

系统内蕴变形矢量(的演化规律采用如下方程表达,

$$\{\dot{\delta}\} = ([I] - \rho^{\beta_1} \{ \eta_\delta \} \{ \eta_\delta \}^T) \{d\} \quad (5b)$$

当 $\vec{\eta}_\delta \cdot \vec{\eta} \leq 0$ 时,

$$[K'] = \rho^\chi (m_R - m_T) [L] \{ \eta_\delta \} \{ \eta_\delta \}^T \quad (5c)$$

$$\{\dot{\delta}\} = \{d\} \quad (5d)$$

式中: $\rho = \sqrt{\{\delta\}^T [M] \{\delta\}} / R$, $[M]$ 为一个度量矩阵,可根据 Salciarini 等的建议选取^[12], m_T, m_R, χ, β_1 及 R 为模型参数,矩阵 $[L]$ 、矢量 $\{N\}$ 分别根据式(6)和式(7)确定。

$$[L] = \frac{GD}{m_R} [K^e] = \frac{GD}{m_R} \text{diag} \{ k_v; k_h; k_h; k_q; k_m; k_m \} \quad (6)$$

式中: k_v, k_h, k_q 及 k_m 为基础与地基耦合系统的竖向、水平、扭矩方向及弯矩方向的弹性刚度系数, G 为系统剪切模量。

矢量 $\{N\}$ 按照式(7)构造

$$\{N\} = -Y [L] \{m\} \quad (7)$$

其中 Y 为标量函数,用来描述当前状态 P 点与屈服面上对应破坏点 F 的距离,可根据 Bienen 等建议的广义屈服面函数^[9]来确定

$$f = \left(\frac{H_2}{h_0 V_0} \right)^2 + \left(\frac{H_3}{h_0 V_0} \right)^2 + \left(\frac{M_2}{m_0 DV_0} \right)^2 + \left(\frac{M_3}{m_0 DV_0} \right)^2 + 2a \left(\frac{H_3 M_2 - H_2 M_3}{h_0 m_0 DV_0^2} \right) + \left(\frac{Q}{q_0 DV_0} \right)^2 - \beta_{12} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{2\beta_1} \left(1 - \frac{V}{V_0} \right)^{2\beta_2} = 0 \quad (8)$$

式中: h_0, m_0, q_0 分别为归一化水平、弯矩及扭矩承载力, β_1, β_2, α 为屈服面形状参数, β_{12} 由 β_1, β_2 确定, $\beta_{12} = \left[\frac{(\beta_1 + \beta_2)^{\beta_1 + \beta_2}}{\beta_1^{\beta_1} \beta_2^{\beta_2}} \right]^2$, 当 $\beta_1 = \beta_2$ 时, $\beta_{12} = 4^{2\beta_1}$ 。假定在屈服面内部存在着一个次加载面,如图2所示。

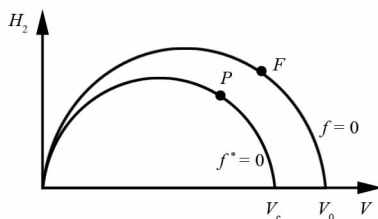


图2 $V - H_2$ 荷载平面上的屈服轨迹

该加载面形状与初始屈服面形状相似,其大小可以由加载面在 V 轴的截距 V_c 确定,则定义

$$Y = \left(\frac{V_c}{V_0} \right)^k \quad (9)$$

其中, V_c 可由式(10)确定, k 为模型参数。

$$f^* = \left(\frac{H_2}{h_0 V_c} \right)^2 + \left(\frac{H_3}{h_0 V_c} \right)^2 + \left(\frac{M_2}{m_0 DV_c} \right)^2 + \left(\frac{M_3}{m_0 DV_c} \right)^2 + 2a \left(\frac{H_3 M_2 - H_2 M_3}{h_0 m_0 DV_c^2} \right) + \left(\frac{Q}{q_0 DV_c} \right)^2 - \beta_{12} \left(\frac{V}{V_c} \right)^{2\beta_1} \left(1 - \frac{V}{V_c} \right)^{2\beta_2} = 0 \quad (10)$$

式(7)中的待定矢量 $\{m\}$ 为塑性势面单位流动方向。根据 Bienen 等的模型实验结果^[9],认为基础与地基耦合系统宏单元模型服从非相关联流动法则,因此塑性势函数表示为

$$g(t) = \left(\frac{H_x}{\alpha_h h_0 V_g} \right)^2 + \left(\frac{H_y}{\alpha_h h_0 V_g} \right)^2 + \left(\frac{M_x}{\alpha_m m_0 DV_g} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{\alpha_m m_0 DV_g} \right)^2 + 2a \left(\frac{H_y M_x - H_x M_y}{\alpha_h \alpha_m h_0 m_0 DV_g^2} \right) + \left(\frac{Q}{\alpha_q q_0 DV_g} \right)^2 - \beta_{34} \left(\frac{V}{V_g} \right)^{2\beta_3} \left(1 - \frac{V}{V_g} \right)^{2\beta_4} = 0 \quad (11)$$

式中: V_g 为当前塑性势面的最大竖向荷载, α_h, α_m 及 α_q 为模型参数,一般取 $\alpha_h = \alpha_m = \alpha_q = \alpha, \beta_3, \beta_4$ 为塑性势面形状参数, β_{34} 可由 β_3, β_4 确定,若 $\beta_3 = \beta_4$, 则 $\beta_{34} = 4^{2\beta_3}$ 。因此式(7)中的待定矢量 $\{m\}$ 按照下式计算

$$\{m\} = \frac{1}{\|\partial g / \partial t\|} \frac{\partial g}{\partial t} \quad (12)$$

联合式(6)、(9)和(12)可以确定矢量 $\{N\}$ 。

建议宏单元模型有21个参数,参数取值可根据相关模型试验或数值模拟反分析得到^[9,12],关于模型参数取值范围尚有待于进一步研究。

2 模型验证

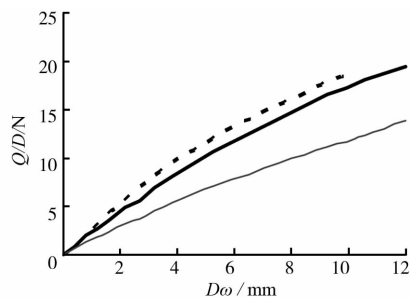
2.1 静力加载试验

采用显式积分算法,将所建议模型通过用户单元子程序 UEL 接口嵌入有限元软件 ABAQUS 中,对 Bienen 等开展的模型试验进行了数值模拟。Bienen 等在模型试验中采用松散硅质砂,相对密度 $D_r = 5\%$,密度为 $\rho_0 = 14.8 \text{ kN/m}^3$,基础模型为直径 $D = 150 \text{ mm}$ 的圆形浅基础^[9]。因为 Nova 等^[5]所进行的模型试验也是在松散砂土中进行的,因此表1中模型参数 m_T, m_R, χ, β, R 及 k 选用了 Salciarini 等的取值,其余参数都来自 Bienen 等所提供数据。

表 1 模型参数

G/MPa	k_v	k_h	k_m	k_a	m_R	m_T
12.7	2.90	2.90	0.55	0.92	5.0	2.0
h_0	m_0	q_0	a	β_1	k	α
0.122	0.075	0.033	0.112	0.76	0.4	3.7
$k_1/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	w_1/mm	w_2/mm	β_3	R	β_4	χ
51.25	20.5	8.0	0.52	0.1	0.5	1.0

对于固定位移比为 $Dd\omega/dw = 1.31$ 的非共面比例加载试验,分别采用式(2a)和(2b)所示的硬化准则进行了数值模拟,将计算得到的扭矩分量 Q 与转角 ω 之间的关系与实验结果进行对比,见图 3。可以看到,宏单元预测得到的扭矩随着转角的增加而不断增大,这与实验结果比较一致,而且式(2b)计算结果略低于模型试验值,最大误差不超过 10%,而式(2a)计算结果明显低于模型试验值。这进一步说明 Bienen 等所建议的硬化准则比仅考虑竖向承载力为竖向塑性位移函数^[8]的假设更为合理。

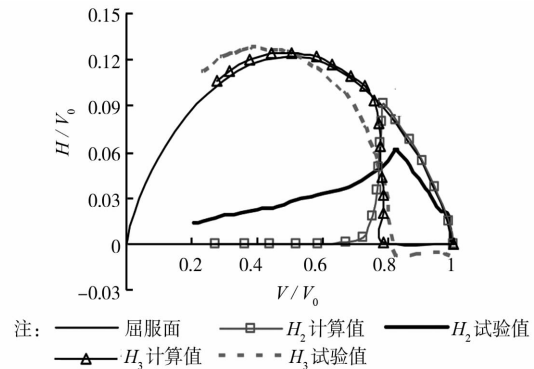


注: - - - 试验结果 — 式(2b)的计算结果 — 式(2a)的计算结果

图 3 扭矩与转角之间的关系

Bienen 等还进行了一组 swipe 非共面复合加载试验,将基础压入地基 6.5 mm 后,通过作动器使得基础沿着水平方向 2 移动 0.2 mm,保持 2 方向位移不变,然后再沿着 3 方向水平移动 1.45 mm,通过传感器记录下这个过程中力的变化规律,如图 4 所示。

采用所建议宏单元模型对此进行了模拟,结果也表示在图 4 中。通过图 4 可以看到,当基础沿着水平方向 2 移动时,相应的荷载反力分量 H_2 不断增加,并且荷载组合点 (V, H_2) 沿着屈服面移动,当改变水平位移方向后, H_2 降低,而 H_3 荷载分量开始增加并最终沿着屈服面移动,宏单元模型较好的预测了这一现象,但在 $V-H_2$ 加载路径及 H_2-u_2 关系上,模拟结果与实验结果有一定差别,这是因为在 Bienen 等模型试验中,加力杆刚度有限,而且传感器之间互相干扰,导致在水平位移方向改变后,加力杆沿着水平方向 2 仍然产生了少量移动,从而使得 H_2

注: — 屈服面 —□— H_2 计算值 —△— H_2 试验值
—□— H_3 计算值 - - - H_3 试验值

(a) 加载路径

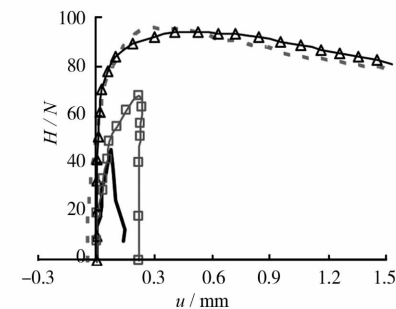
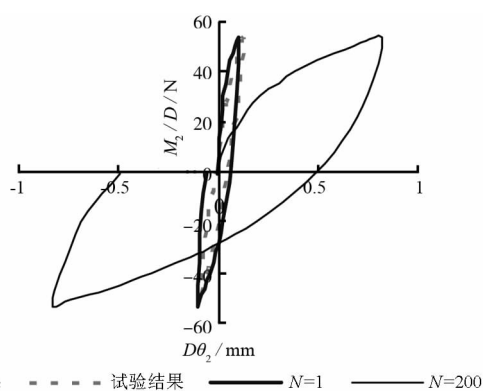
注: - - - H_3 试验值 —△— H_3 计算值
—□— H_2 试验值 —□— H_2 计算值(b) H_2 、 H_3 与对应位移关系

图 4 swipe 加载试验的数值模拟

出现缓慢降低趋势。而在宏单元预测时,根据 swipe 加载方法的原理^[15],假定加力杆沿着 3 方向移动时,2 方向位移不再发生变化,所以 $V-H_2$ 加载路径及 H_2-u_2 关系出现了比较急剧的改变。

2.2 循环加载试验

目前尚没有见到六自由度循环复合加载试验的报道,因此只对 Byrne 和 Houlsby 在松散钙质砂地基上开展的三自由度共面循环复合加载试验^[8,14]进行了模拟。试验所采用砂土干密度为 $\rho_d = 9.32 \text{ kN/m}^3$,圆形浅基础模型直径 $D = 150 \text{ mm}$,进行了 H_3-M_2 加载面上的循环加载试验。模型参数取为^[8]: $G = 11.3 \text{ MPa}$, $k_v = 2.65$, $k_h = 2.3$, $k_m = 0.46$, $h_0 = 0.154$, $m_0 = 0.094$, $a = 0.25$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.82$, $\alpha = 2.0$, $k_1 = 14 \text{ N/mm}$, $w_1 = 14.58 \text{ mm}$, $w_2 = 50 \text{ mm}$, k_1, w_1 与 w_2 是根据文献^[8]硬化准则参数值转换而来的,其余参数与表 1 相同。Byrne 等^[14]只进行了一次加卸载循环,从图 5 可以看到,在 $N = 1$ 时, $M_2-\theta_2$ 关系的数值模拟与模型试验结果比较吻合,图 5 中还给出了 $N = 200$ 次的模拟结果,可以看到加卸载路径出现了明显的滞回圈,并且不可恢复变形量增加,这比较符合实际情况。

图5 $M_2-\theta_2$ 关系的数值模拟

3 结 论

通过引入六自由度荷载空间内的屈服面和塑性势函数,对 Salciarini 等所建立的亚塑性宏单元进行了改进,进而提出了一个严格的六自由度宏单元模型,并与已有的模型试验结果进行了对比验证。通过比较看到,所建议的宏单元模型能够比较合理地描述非共面复合加载路径及循环加卸载实验中的广义力-位移关系,这样在对上部结构进行动力分析时,以一个宏单元来代替整个基础与地基耦合系统,可以节省计算时间,同时提高上部结构边界条件的模拟精度。

参考文献:

- [1] Randolph M F, Gaudin C, Gourvenec S M, et al. Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(7): 818-834.
- [2] Fan Q L, Luan M T, Gong X B. A unified equation of failure envelope for skirted foundations in normally consolidated clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(10): 1917-1924.
- [3] 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 Q L, Luan M T. 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.
- [4] DNV-OS-J101 Design of offshore wind turbine structures [S]. Oslo: Det Norske Veritas, Norway, 2010.
- [5] Nova R, Montrasio L. Settlements of shallow foundations on sand [J]. *Geotechnique*, 1991, 41(2): 243-256.
- [6] Gottardi G, Houlsby G T, Butterfield R. Plastic response of circular footings on sand under general planar loading [J]. *Geotechnique*, 1999, 49(4): 453-469.
- [7] Houlsby G T, Cassidy M J. A plasticity model for the behaviour of footings on sand under combined loading [J]. *Geotechnique*, 2002, 52(2): 117-129.
- [8] Cassidy M J, Byrne B W, Houlsby G T. Modelling the behaviour of circular footings under combined loading on loose carbonate sand [J]. *Geotechnique*, 2002, 52(10): 705-712.
- [9] Bienen B, Byrne B W, Houlsby G T, et al. Investigating six-degree-of-freedom loading of shallow foundations on sand [J]. *Geotechnique*, 2006, 56(6): 367-379.
- [10] Einav I, Cassidy M J. A framework for modelling rigid footing behaviour based on energy principles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(7): 491-504.
- [11] Govoni L, Gourvenec S, Gottardi G. Centrifuge modelling of circular shallow foundations on sand [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2010, 10(2): 35-46.
- [12] Salciarini D, Tamagnini C. A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads [J]. *Acta Geotechnica*, 2009, 4(3): 163-176.
- [13] Kolymbas D. An outline of hypoplasticity [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1991, 61(3): 143-151.
- [14] Byrne B W, Houlsby G T. Model testing of circular flat footings on uncemented loose carbonate sand: experimental data [R]. Oxford: University of Oxford, 1998.
- [15] Govoni L, Gourvenec S, Gottardi G. A centrifuge study on the effect of embedment on the drained response of shallow foundations under combined loading [J]. *Geotechnique*, 2011, 61(12): 1055-1068.

(编辑 胡英奎)