

# 浅基础地基承载力与变形特性离心模型试验研究

罗 强<sup>\*1,2</sup>, 王 恒<sup>1</sup>

(1. 南阳师范学院 土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061;

2. 大连理工大学 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 采用土工离心模型试验方法,对装样、饱和、加载等试验技术进行研究,以保证试验重复性与可靠性,并分别从承载力与变形两个方面对浅基础地基问题进行试验研究. 研究结果表明:对圆形和方形浅基础而言,密砂地基的竖向荷载-位移曲线具有明显的拐点,竖向荷载在曲线出现拐点以后的变化不明显;分析地基承载力系数时,达到地基承载力  $q_0$  时的基础沉降对地基承载力系数  $N_q$  的影响不明显,对  $N_r$  的影响比较显著;基础形状的变化对于  $N_q$  的影响不明显,对  $N_r$  的影响比较显著.

**关键词:** 离心机;模型试验;浅基础地基;承载力

**中图分类号:** TU441

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201503011

## 0 引 言

针对浅基础地基承载力与变形特性进行分析时,国内外学者通常采用小比尺模型试验,例如 De Beer<sup>[1]</sup>、Ko 等<sup>[2]</sup>的试验结果多被用于验证相关的地基承载力理论公式,也为发展新的理论分析方法提供了可靠依据. 然而,小比尺模型试验往往不能满足模型相似律的基本要求,试验过程中存在着较大的比尺效应. 离心模型试验是一种崭新的研究方法,能够满足绝大多数模型相似律的要求,较好地反映土体自重应力对试验结果的影响,因此,离心模型试验比小比尺模型试验具有更加明显的优势与可靠性.

从 20 世纪 70 年代开始,国内外学者对离心模型试验方法进行了一系列的研究. Yamaguchi 等<sup>[3]</sup>和 Kimura 等<sup>[4]</sup>采用离心模型试验方法研究了地基变形特性,其研究结果表明地基承载力系数  $N_r$  随着基础宽度的增加而呈现减小的趋势,即基础尺寸效应. Hettler 等<sup>[5]</sup>认为基础尺寸效应与应力水平相关;然而, Ovesen<sup>[6]</sup>认为当基础最小尺寸与材料颗粒尺寸之间的比值大于 30 时,粒径效应对地基承载力的影响将会消失. 徐光明

等<sup>[7]</sup>认为当浅基础模型宽度与材料平均粒径  $d_{50}$  的比值大于 30 时,粒径效应对试验结果的影响可以忽略.

目前,世界上大约有 100 多台土工离心机,主要是臂式离心机,鼓式离心机的数量相对较少. 臂式离心机在浅基础问题的试验研究中应用比较广泛,例如, Leung 等<sup>[8]</sup>在 100g 的离心加速度条件下研究了地基初始相对密度的变化规律; Zhu 等<sup>[9]</sup>研究了基础尺寸效应对地基承载力、基础形状因子的影响. 鼓式离心机在岩土工程研究领域中的应用相对较少,试验技术和方法更是鲜见于文献<sup>[10]</sup>. 由于鼓式离心模型试验方法的研究工作尚处于初期探索阶段,有必要从试验技术和数据分析方法等方面对其进行探讨.

本文采用土工鼓式离心机,对模型试验中的装样、饱和、加载等试验技术进行研究,在饱和和密砂条件下对浅基础问题进行模型试验,研究地基承载力与变形特性.

## 1 离心模型试验方法研究

### 1.1 土工鼓式离心机

土工鼓式离心机的整体构造如图 1 所示.

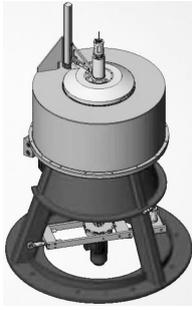


图1 鼓式离心机示意图

Fig. 1 Sketch of drum centrifuge

离心机的鼓槽尺寸为 1.40 m(直径) $\times$ 0.35 m(竖向宽度) $\times$ 0.27 m(径向深度)<sup>[10]</sup>.

## 1.2 试验材料

模型试验采用经过粒度调整( $d_{\max} < 0.5$  mm)的福建标准砂, 相对密度  $D_r = 80\%$ , 颗粒级配曲线如图 2 所示.

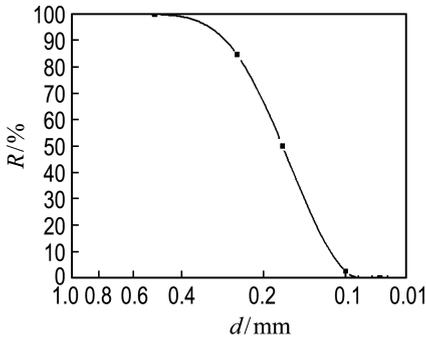


图2 土料颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of soil particle

对砂样进行三轴排水剪切试验, 试验结果如图 3 所示, 试样的抗剪强度指标: 黏聚力  $c = 0$  kPa, 内摩擦角  $\phi = 40^\circ$ .

## 1.3 浅基础模型

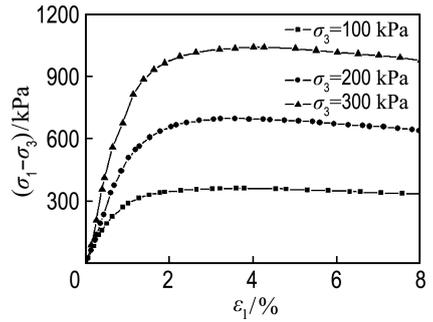
离心模型试验采用圆形、方形铝质浅基础模型, 如图 4(a) 所示. 在浅基础模型的表面均匀粘贴一层试验所用砂粒, 如图 4(b) 所示, 保证浅基础模型与土体之间有相同的摩擦因数.

浅基础模型宽度  $D_m$  的最小尺寸为 25 mm, 砂土的  $d_{50} = 0.17$  mm,  $D_m/d_{50} = 147$ . 根据 Ovesen<sup>[6]</sup>、徐光明等<sup>[7]</sup> 的试验结论, 当  $D_m/d_{50} > 30$  时, 可以忽略粒径效应对试验结果的影响.

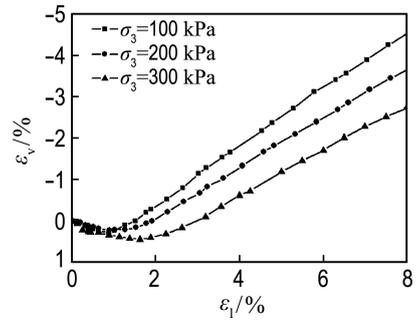
## 1.4 装样方法研究

砂样采用砂雨法制备(如图 5 所示), 干砂从漏斗底部的空心圆柱状喷嘴流出, 通过筛网均匀

洒落到模型箱中<sup>[11]</sup>. 模型箱的尺寸: 宽度为 298 mm, 深度为 170 mm, 高度为 280 mm.



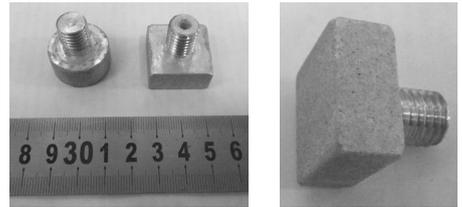
(a) 偏应力-轴向应变



(b) 体积应变-轴向应变

图3 偏应力、体积应变-轴向应变关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of deviator stress, volume strain-axial strain



(a) 浅基础模型 (b) 基础表面砂层

图4 浅基础模型示意

Fig. 4 Sketch of models of shallow foundation

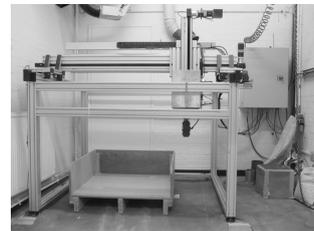


图5 砂雨法装样设备

Fig. 5 Automatic sand pourer

通过干砂试样颗粒间的毛细效应, 水流被均匀地吸入砂样中, 此过程简称为毛细渗透过程, 其

工作原理如图 6 所示.

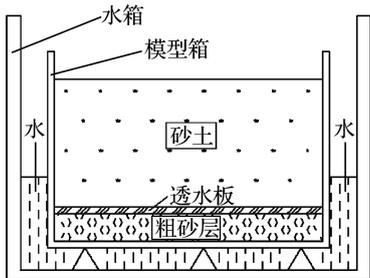


图 6 毛细渗透原理示意图

Fig. 6 Sketch of principle of capillary percolation test

当毛细渗透过程结束时,砂样表面呈现湿润状态,如图 7 中左侧模型箱所示.如果毛细渗透过程没有结束,砂样表面呈现干燥状态,如图 7 中右侧模型箱所示.



图 7 砂样的毛细渗透过程

Fig. 7 Capillary percolation test for sand

毛细渗透过程结束后,将模型箱从水箱中取出并竖直放置在鼓槽内,如图 8 所示.在毛细效应的作用下,砂样的初始状态不受安装过程的扰动,砂样不会在自重的作用下发生倒塌,砂样饱和度一般能达到 60%~70%.

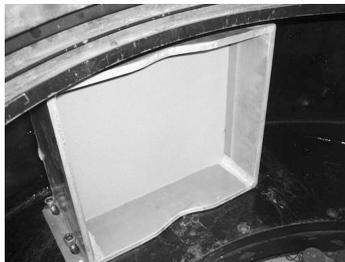


图 8 模型箱安置在鼓槽内

Fig. 8 Installation of model box with sand into drum groove

### 1.5 饱和及加载方法研究

离心模型试验原理如图 9 和 10 所示.

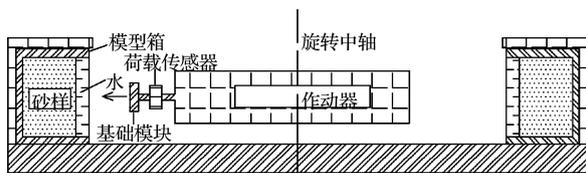


图 9 无基础埋深离心试验示意图

Fig. 9 Sketch of centrifuge test without footing embedment

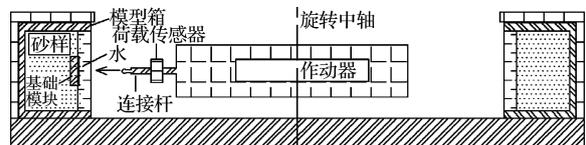


图 10 有基础埋深离心试验示意图

Fig. 10 Sketch of centrifuge test with footing embedment

在无基础埋深情况下,浅基础与作动器之间采用固定连接方式,如图 9 所示.在有基础埋深情况下,浅基础与作动器之间采用球形连接方式,如图 10 所示:在作动器上固定一个连接杆,当作动器向浅基础推进时,连接杆前端的圆球将会与浅基础表面的球窝相接触,从而对浅基础施加压力.

试验采用位移控制方法进行加载,作动器的径向加载速度设定为 0.01 mm/s,其对试验结果的影响可以忽略<sup>[12]</sup>.

## 2 试验结果

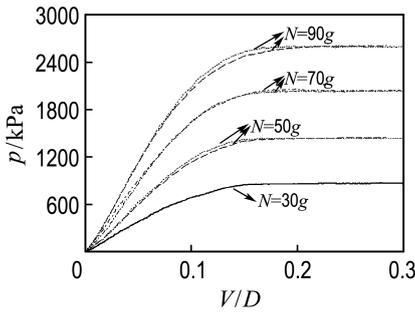
### 2.1 荷载-位移关系

在圆形、方形浅基础情况下,按照不同的基础直径和埋深,共进行 9 组试验.试验结果如图 11 和 12 所示.图中,  $D$  为真实基础宽度,  $D = D_m \times n$ ,  $n = N/g$ ,  $N$  为离心加速度;  $D_f$  为真实基础埋深;  $V$  为浅基础竖向位移, 竖向荷载  $p =$  基底反力 / 基础面积. 为了验证试验方法的可重复性,若干工况重复进行.

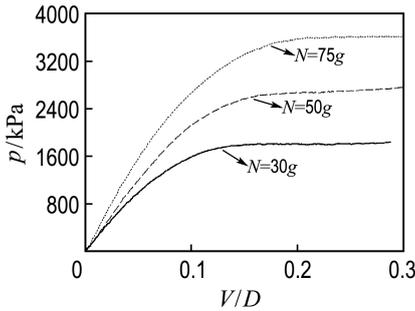
由图 11 和 12 可知:(1)当  $V/D > 0.15$  (图 11)或  $V/D > 0.2$  (图 12)时,竖向荷载-基础沉降关系曲线具有明显的拐点;达到拐点以后,竖向荷载的变化不明显,关系曲线呈现近似水平状态.(2)拐点处的竖向荷载可以作为地基承载力  $q_u$ <sup>[13]</sup>,  $q_u$  随着基础宽度的增加而增加.例如,在图 12(c)中,当基础宽度  $D$  分别为 0.90、1.50 和 2.25 m 时,地基承载力  $q_u$  分别为 2 380、3 230 和

4 480 kPa。(3)随着基础埋深的增加,地基承载力  $q_u$  逐渐增加。例如,在图 11(b)中, $D_f/D=1/2$ ,不同基础宽度时的  $q_u$  分别为 1 810、2 672 和

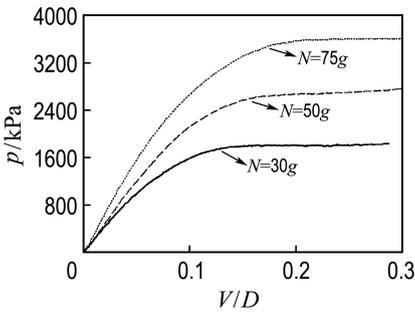
3 610 kPa;在图 11(c)中, $D_f/D=2/3$ ,不同基础宽度时的  $q_u$  分别为 2 180、3 010 和 4 030 kPa;图 11(c)中的地基承载力比图 11(b)中的结果提高了 20%、13%和 12%。(4)在达到地基承载力  $q_u$  之前,竖向荷载-基础沉降关系曲线的斜率随着基础宽度的增加而增加。例如,在图 12(c)中, $D_f/D=2/3$ ,当基础直径  $D$  分别为 0.90、1.50 和 2.25 m 时, $V/D=0.1$  所对应的竖向荷载分别为 1 580、2 250 和 3 050 kPa,可知曲线的斜率是逐渐增加的。



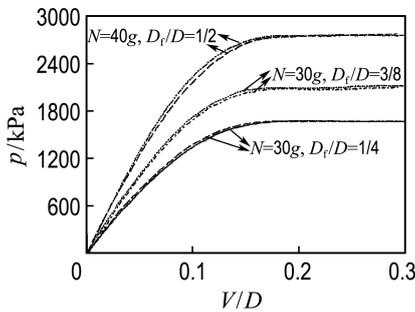
(a)  $D_m=25\text{ mm}, D_f/D=0$



(b)  $D_m=30\text{ mm}, D_f/D=1/2$



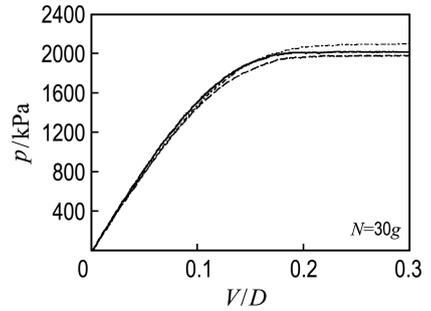
(c)  $D_m=30\text{ mm}, D_f/D=2/3$



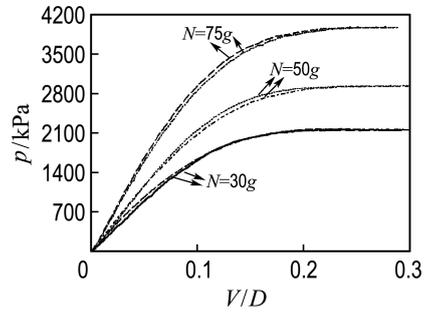
(d)  $D_m=40\text{ mm}$

图 11 竖向荷载-基础沉降关系曲线(圆形浅基础)

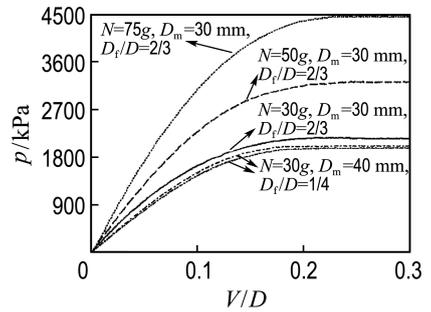
Fig. 11 Curves of vertical load-settlement (Circular foundation)



(a)  $D_m=40\text{ mm}, D_f/D=1/4$



(b)  $D_m=30\text{ mm}, D_f/D=1/2$



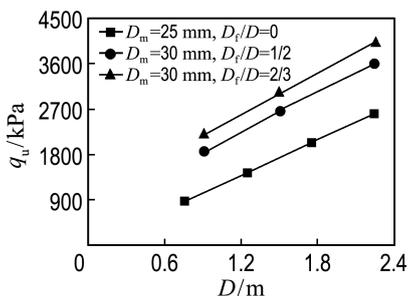
(c)  $D_m=30\text{ mm}, D_f/D=2/3; D_m=40\text{ mm}, D_f/D=1/4$

图 12 竖向荷载-基础沉降关系曲线(方形浅基础)  
Fig. 12 Curves of vertical load-settlement (Square foundation)

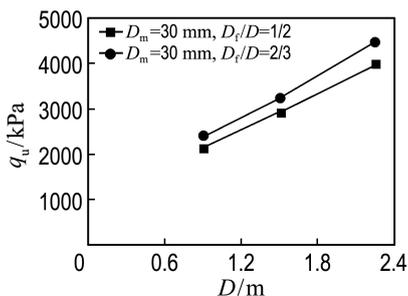
## 2.2 地基承载力

根据图 11 和 12 的试验结果,对地基承载力

$q_u$  与基础宽度  $D$  之间的关系进行研究,结果如图 13 所示.在相同的基础宽度和基础埋深条件下,对圆形和方形浅基础的地基承载力进行对比,结果如图 14 所示.



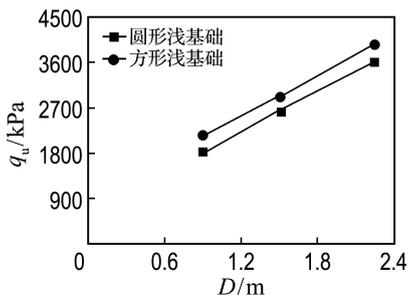
(a) 圆形浅基础



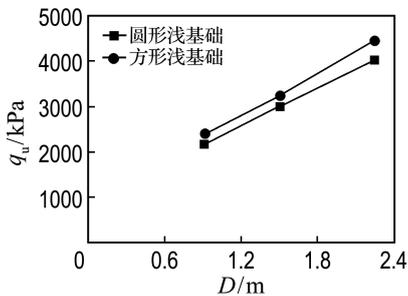
(b) 方形浅基础

图 13 地基承载力与基础宽度的关系

Fig. 13 Relationship of bearing capacity and foundation width



(a)  $D_m=30\text{ mm}, D_f/D=1/2$



(b)  $D_m=30\text{ mm}, D_f/D=2/3$

图 14 圆形和方形浅基础试验结果对比

Fig. 14 Results comparison between circular and square shallow foundation

由图 13 和 14 可知:(1)地基承载力  $q_u$  随着基础宽度的增加而增加,两者之间呈现线性关系.(2)随着基础埋深的增加,地基承载力逐渐增加.(3)有基础埋深时,当基础宽度相同时,圆形浅基础的地基承载力要低于方形浅基础的地基承载力.

### 2.3 地基承载力系数

太沙基地基承载力的表达形式如下:

$$q_u = S_c c N_c + S_r \frac{1}{2} \gamma D N_r + S_q \gamma D_f N_q \quad (1)$$

式中: $c$  为黏聚力; $\gamma$  为土体密度; $N_c$ 、 $N_r$ 、 $N_q$  分别为地基承载力系数; $S_c = 1.2$ , 形状因子  $S_q = 1.0$ , 当浅基础形状为圆形和方形时  $S_r$  分别为 0.6 和 0.8.

对于砂质地基,可忽略式(1)中的黏聚力项:

$$\frac{q_u}{\gamma D} = \frac{1}{2} S_r N_r + \frac{D_f}{D} S_q N_q \quad (2)$$

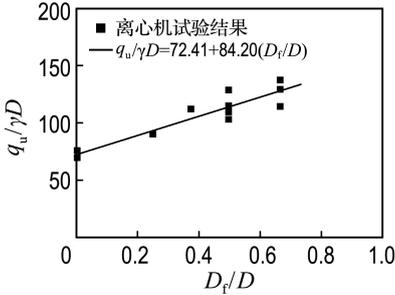
根据 Ovesen<sup>[6]</sup> 和 Ali Aiban 等<sup>[14]</sup> 的研究结论,分析承载力系数时需要考虑达到地基承载力  $q_u$  时的基础沉降  $\delta$ ,式(2)可重新表达为

$$\frac{q_u}{\gamma D} = \frac{1}{2} S_r N_r + \left( \frac{D_f + \delta}{D} \right) S_q N_q \quad (3)$$

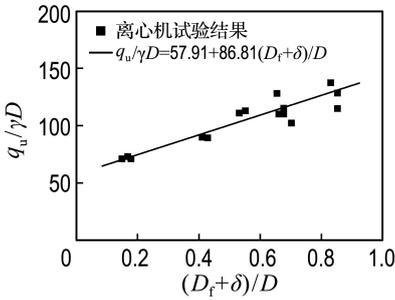
在分析地基承载力系数时,以  $q_u/\gamma D$  为纵坐标, $D_f/D$  或  $(D_f + \delta)/D$  为横坐标,对两者的关系进行线性拟合,拟合式的常数项为  $S_r N_r/2$ ,一次项系数为  $S_q N_q$ .

根据图 11 和 12 的试验结果,对地基承载力系数进行分析,结果如图 15 和 16 所示.对于相对密度  $D_r = 80\%$  的密砂,其内摩擦角  $\phi = 40^\circ$ ,通过太沙基地基承载力系数表可得到承载力系数分别为  $N_r = 130, N_q = 80.5$ .

由图 15 和 16 可知:(1)在圆形浅基础试验中:不考虑  $\delta$  时,承载力系数  $N_q$  和  $N_r$  分别为 84.20 和 241.37,考虑  $\delta$  时, $N_q$  和  $N_r$  分别为 86.81 和 193.03.  $\delta$  对  $N_q$  的影响不明显, $N_q$  的数值与太沙基公式的结果(80.5)比较接近.然而, $\delta$  对  $N_r$  的影响比较显著,考虑  $\delta$  时的  $N_r$ (193.03) 比不考虑  $\delta$  时的  $N_r$ (241.37) 减小 20%,并且,它比太沙基公式结果(130)高出 48%. (2)在方形浅基础试验中, $\delta$  对  $N_q$  的影响不明显.  $\delta$  对  $N_r$  的影响比较显著,考虑  $\delta$  时的  $N_r$ (151.75) 比不考虑  $\delta$  时的  $N_r$ (186.65) 减小 19%,并且,它比太沙基公式结果高出 17%. (3)无论是否考虑  $\delta$ ,圆形和方



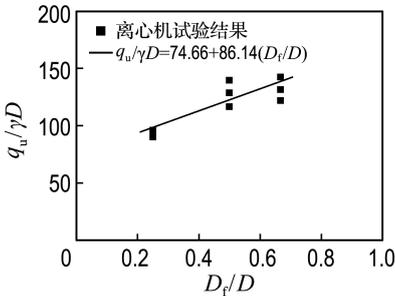
(a) 不考虑基础沉降  $\delta$



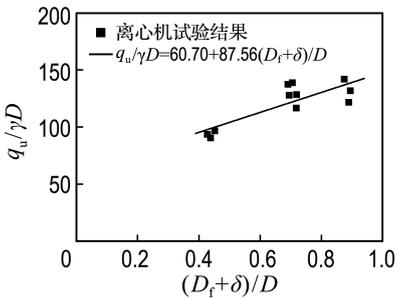
(b) 考虑基础沉降  $\delta$

图 15 圆形浅基础地基承载力系数分析

Fig. 15 Analysis of bearing capacity factors for circular shallow foundation



(a) 不考虑基础沉降  $\delta$



(b) 考虑基础沉降  $\delta$

图 16 方形浅基础地基承载力系数分析

Fig. 16 Analysis of bearing capacity factors for square shallow foundation

浅基础试验所得到的  $N_r$  要高于方形浅基础的试验结果,例如:考虑  $\delta$  时,圆形浅基础的  $N_r$  比方形浅基础的  $N_r$  高出 27%。基础形状的变化引起  $N_r$  发生改变是由于基础形状因子  $S_r$  的变化所引的,以图 15 和 16 的(b)为例:圆形和方形浅基础试验结果的线性拟合关系的常数项分别为 57.91 和 60.70,将常数项除以  $S_r/2$  可以得到  $N_r$ ,  $S_r$  在圆形或方形浅基础时的数值为 0.6 或 0.8,因此,不同基础形状的  $N_r$  之间的差异比较明显。

### 3 结 论

(1)对于圆形、方形浅基础而言,密砂地基的竖向荷载-基础沉降曲线具有明显的拐点,竖向荷载在拐点以后的变化不明显,呈现近似水平分布状态。

(2)在有基础埋深的条件下,当基础宽度相同时,圆形浅基础的地基承载力要低于方形浅基础的。

(3)分析地基承载力系数时,达到地基承载力时的基础沉降  $\delta$  对  $N_q$  的影响不明显,其对  $N_r$  的影响则比较显著;考虑  $\delta$  时所得到的  $N_r$  比不考虑  $\delta$  时的  $N_r$  减小 20%。

(4)基础形状的变化对于  $N_q$  的影响不明显,而其对  $N_r$  的影响则比较显著。

### 参考文献:

- [1] De Beer E E. Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand [J]. **Geotechnique**, 1970, **20**(4):387-411.
- [2] Ko Hon-yim, Davidson L W. Bearing capacity of footings in plane strain [J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1973, **99**(SM1):1-23.
- [3] Yamaguchi H, Kimura T, Fuji-i N. On the influence of progressive failure on the bearing capacity of shallow foundations in dense sand [J]. **Soils and Foundations**, 1976, **16**(4):11-22.
- [4] Kimura T, Kusakabe O, Saitoh K. Geotechnical model tests of bearing capacity problems in a centrifuge [J]. **Geotechnique**, 1985, **35**(1):33-45.
- [5] Hettler A, Gudehus G. Influence of the foundation width on the bearing capacity factor [J]. **Soils and Foundations**, 1988, **28**(4):81-92.

形浅基础试验所得到的  $N_q$  是比较接近的,表明基础形状的变化对于  $N_q$  的影响不明显。(4)圆形

- [6] Ovesen N K. Centrifuge testing applied to bearing capacity problems of footings on sand [J]. *Geotechnique*, 1975, **25**(3):394-401.
- [7] 徐光明, 章卫民. 离心模型试验中的粒径效应和边界效应研究[J]. *岩土工程学报*, 1996, **18**(3):80-85.  
XU Guang-ming, ZHANG Wei-min. Study on the grain-size effects and boundary effects in centrifugal test [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **18**(3):80-85. (in Chinese)
- [8] Leung C F, Lee F H, Khoo E. Behavior of gravity casisson on sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(3):187-196.
- [9] ZHU Fan-yu, Clark J I, Phillips R. Scale effect of strip and circular footings resting on dense sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, **127**(7):613-621.
- [10] 罗强. 非共轴本构模型的数值应用及离心机试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
LUO Qiang. Numerical application and centrifugal modeling study of a non-coaxial constitutive model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 曾虹静, 王忠涛, 罗强, 等. 自制砂土装样设备及其控制要素分析[J]. *人民长江*, 2012, **43**(11):66-70.  
ZENG Hong-jing, WANG Zhong-tao, LUO Qiang, *et al.* Introduction to a new sand pourer and its control element analysis [J]. *Yangtze River*, 2012, **43**(11):66-70. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] Vesic A S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1973, **94**(3):661-688.
- [14] Ali Aiban S, Znidarcic D. Centrifugal modeling of bearing capacity of shallow foundations on sands [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, **121**(10):704-712.

## Experimental research on centrifugal modeling test for bearing capacity and deformation behavior of shallow foundations

LUO Qiang<sup>\*1,2</sup>, WANG Heng<sup>1</sup>

( 1. Academy of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Based on the principle of geotechnical centrifugal modeling test, the experimental techniques of sample preparation, sample saturation and loading are studied to ensure the repeatability and reliability of the modeling tests. And then, the modeling studies of shallow foundations are performed in respect of bearing capacity and deformation. It could be seen from the test results that: there is an obvious inflection point at the curves of vertical load-settlement for circular and square foundations on dense sand, and the variation of the vertical load is not obvious after the appearing of the inflection point. When the bearing capacity factors are analyzed with the experimental results, the settlement corresponding to the bearing capacity  $q_u$  imposes little influence on the bearing capacity coefficient  $N_q$ , but it imposes apparent influence on  $N_r$ . The variation of foundation shape imposes little influence on  $N_q$ , but it imposes apparent influence on  $N_r$ .

**Key words:** centrifuge; modeling test; shallow foundations; bearing capacity