

DOI: 10.11779/CJGE201404001

# 确定地基承载力的新方法

杨光华<sup>1, 2, 3</sup>, 姜燕<sup>1, 2</sup>, 张玉成<sup>1, 2</sup>, 王恩麒<sup>3</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510640;  
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 地基承载力的合理确定对地基设计是最重要的一个内容。现场原位压板试验被认为是确定地基承载力最可靠的方法。但实际基础的地基承载力不仅与土性有关, 还与基础的尺寸、埋深和沉降要求有关, 压板试验的尺寸不是实际基础的尺寸, 如何由压板试验合理地确定实际基础的地基承载力是一个还没有很好解决的问题。提出一个新的解决方法, 即由压板试验反算地基的强度参数和变形指标, 然后用这些参数对具体基础采用切线模量法计算基础的荷载和沉降关系的  $p-s$  曲线, 再根据上部结构对基础的沉降要求和地基强度安全系数要求的双控原则, 由  $p-s$  曲线确定满足沉降和强度要求的地基承载力, 而不是直接由压板载荷试验曲线来确定地基承载力, 这样可以更好地考虑基础的尺寸效应。通过案例进行了说明, 并与现行的规范方法进行了比较, 说明了新方法的合理性。

**关键词:** 地基承载力; 现场压板载荷试验; 切线模量法

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)04-0597-07

作者简介: 杨光华(1962-), 男, 广东罗定人, 博士, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事本构理论、基础工程、软土工程及基坑工程等方面的研究、设计及咨询工作。E-mail: yghsks@21cn.com, ygh@gdsky.com.cn。

## New method for determination of bearing capacity of soil foundation

YANG Guang-hua<sup>1, 2, 3</sup>, JIANG Yan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yu-cheng<sup>1, 2</sup>, WANG En-q<sup>3</sup>

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510640, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Reasonable determination of bearing capacity of foundation is the most important part of foundation design. The in-situ plate loading test is the most reliable method to determine the bearing capacity. However, the actual bearing capacity relates to not only soil property but also the size, buried depth and settlement requirement of the foundation. The size of the plate in the plate loading test is not the same as that of actual foundation, and how to determine the bearing capacity of the actual foundation by the plate loading test reasonably is not yet addressed. Thus, a new solution method is proposed in this paper. That is, the strength and deformation parameters are back-computed by the plate loading test. Then, based on those parameters, the tangent modulus method is employed to compute the load - settlement curve ( $p-s$  curve) of the foundation. Finally, according to the double controlling principles, the settlement requirement and strength safety factor requirement of the foundation, the bearing capacity of the foundation is determined by the  $p-s$  curve. The bearing capacity meets both settlement and strength requirements of the foundation. An example is adopted to illustrate the proposed method, and results are compared with those by the methods of the current codes of China to prove the rationality of this new method.

**Key words:** bearing capacity; in-situ plate loading test; tangent modulus method

## 0 引言

地基承载力是土力学中的一个基本问题, 也是地基基础工程中的一个根本性的重大问题, 关于地基承载力, 无论是理论方面还是试验方面, 国内外都进行了大量的研究<sup>[1-2]</sup>。目前确定地基承载力的方法之一是根据土的抗剪强度指标, 按地基极限承载力公式计算地基的极限承载力, 然后将极限承载力除以一个安全

系数  $K$  而得到, 通常可取  $K=2\sim 3$ , 再复核相应承载力下基础的沉降。这种方法关键是土的抗剪强度指标的合理性, 由于这种方法的强度指标和用于计算沉降的参数通常都是由室内试验得到, 由于室内试验存在取样扰动的影响, 因而, 存在一定的误差, 尤其是用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378131)

收稿日期: 2013-08-06

于沉降计算, 误差更大, 在我国地基规范中对沉降计算要采用一个变化较大的经验系数对沉降计算的结果进行修正, 经验系数达 0.2~1.4, 同时承载力与沉降分离计算, 但这两者其实是一个整体, 由于缺乏有效地解决办法, 目前的方法是用极限平衡理论计算极限承载力, 用线弹性理论来计算沉降, 把一个问题分解为两个近似问题来解决。除此以外, 人们认为确定地基承载力最直接可靠的方法是采用原位压板载荷试验来确定, 但实际上地基的承载力不仅是与土性有关, 还与基础的宽度和埋深有关。压板试验通常是进行小尺寸无埋深的试验, 不可能用原型基础进行试验来确定地基的承载力, 这就存在一个如何用小尺寸的压板载荷试验来确定实际大尺寸基础下地基的承载力问题, 这个问题理论上没有得到很好的解决。在各国的工程规范中, 如何应用压板试验来确定地基承载力的应用上, 最为具体和明确的是中国的地基基础设计规范<sup>[3]</sup>, 欧洲岩土规范<sup>[4]</sup>和加拿大基础工程规范<sup>[5]</sup>都没有中国的地基规范那样具体, 可以说中国地基规范方法是最完整详尽的, 但在理论上则并不很完善, 可以说仍是一个半理论半经验的方法。例如, 大多数土的压板试验的荷载沉降曲线都缺乏明显的线性比例界限, 因而采用了按沉降  $s$  与压板直径  $b$  之比  $s/b$  这一沉降比来确定地基承载力的特征值, 而这个沉降比值就是一个经验性很强的数值, 国家规范<sup>[3]</sup>取为  $s/b=0.01\sim 0.015$ , 广东地基规范取为  $s/b=0.015\sim 0.02$ , 且尚不是一个定值, 因此, 当取  $s/b=0.01$  与取  $s/b=0.02$  时, 对同一种土可能会得到差异较大的承载力特征值, 而同一种土同一个试验会得到不同的承载力值, 这显然是不太合理的。因此, 如何更科学、合理而可靠地确定地基的承载力, 并没有得到很好的解决。而地基承载力的合理确定不仅是土力学理论的一个基本问题, 更是对工程设计影响巨大的重要问题。对此提出一个可以认为是更科学合理的解决办法, 其思路是用原位压板试验确定土的强度指标和变形参数, 用于计算实际基础的荷载沉降曲线 ( $p-s$  曲线), 由实际基础的  $p-s$  曲线, 根据地基承载力的最基本原则, 即强度安全和变形控制双原则确定对应基础下的地基承载力取值。由于土的强度指标和变形参数是唯一的, 由此计算所得的基础的  $p-s$  曲线是唯一的, 当确定地基承载力的原则是唯一时, 则其确定的承载力也是唯一的。这样就可以解决目前规范方法由沉降比取值不唯一而造成的承载力特征值不唯一的问题, 会获得更科学合理的结果。

## 1 目前根据压板试验确定地基承载力的方法的现状

目前用压板试验确定地基承载力的最权威和完整

的方法是我国建筑地基设计规范的方法<sup>[3]</sup>。该方法从荷载试验先确定地基承载力的特征值  $f_{ak}$ , 然后再根据具体基础的宽度和埋深进行修正, 从而得出对应基础上地基承载力的修正值  $f_a$

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma(b-3) + \eta_d \gamma_m(d-0.5) \quad (1)$$

式中  $f_a$  为修正后的地基承载力特征值 (kPa);  $f_{ak}$  为地基承载力特征值 (kPa);  $\eta_b$ ,  $\eta_d$  为考虑基础宽度和深度影响的地基承载力修正系数, 是根据一定的理论基础上确定的经验值, 见规范的方法<sup>[3]</sup>;  $\gamma$  为基础底面以下的土体, 地下水位以下取有效重度 (kN/m<sup>3</sup>);  $\gamma_m$  为基础底面以上土的加权平均重度, 地下水位以下时取有效重度 (kN/m<sup>3</sup>);  $b$  为基础宽度 (m), 当小于 3 m 时按 3 m 考虑, 大于 6 m 时按 6 m 考虑;  $d$  为基础埋置深度 (m)。

地基承载力特征值由现场平板荷载试验确定。规范的确定方法是根据试验所得的荷载 - 沉降 ( $p-s$  曲线) 来确定:

- (1) 当  $p-s$  曲线有明显比例界限时, 取该比例极限所对应的荷载值。
- (2) 当极限荷载小于对应比例界限的荷载值的 2 倍时, 取极限荷载值的一半。
- (3) 当不能按以上两款确定时, 如压板面积为  $0.25\sim 0.5 \text{ m}^2$ , 可取  $s/b=0.01\sim 0.015$  所对应的荷载, 但其值不应大于最大加载量的一半,  $b$  为压板宽度或直径。广东的建筑地基基础设计规范则取  $s/b=0.015\sim 0.02$ 。

这一方法其实是一种半理论半经验的方法, 修正式(1)在形式上是与土力学地基承载力公式是一致的, 包含基础宽度和埋深的影响。如当采用土的强度指标时, 国家规范给出的修正地基承载力公式采用的理论公式计算为<sup>[3]</sup>

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (2)$$

式中  $b$  为基础宽度, 当小于 3 m 时取 3 m, 当大于 6 m 时取 6 m;  $c_k$  为基础底面下土的凝聚力;  $M_b$ ,  $M_d$ ,  $M_c$  为相应的承载力系数。

比较式(1)、(2)可见, 黏聚力  $c$  对承载力的贡献是与基础尺寸无关的, 因此, 由压板试验确定的特征值用于设计基础时只要修正基础宽深的影响。规范方法的经验性表现为

(1) 由压板试验确定特征值时的经验性。通常采用  $s/b$  值确定的特征值的目的是保证实际基础的沉降不致过大, 因此, 其内含了按沉降控制确定地基承载力的修正值, 但实际的地基沉降还要另外计算, 还不能保证由此确定的承载力对应的沉降就可以满足要求。因此这个方法确定的地基承载力也许可以保证强

度安全, 但尚不能保证变形满足。

(2)  $s/b$  取值是一个经验值。尚缺乏充分的准确的理论关系, 不同地区可能取值会不同, 如目前广东省建筑地基设计规范<sup>[4]</sup>取值 0.015~0.02, 大于国家建筑地基规范的取值 0.01~0.015。宰金珉的研究则认为对中低压缩土可取更大值<sup>[5]</sup>, 认为对于压板面积为 0.25, 0.5, 1.0  $\text{m}^2$  时,  $s/b$  取值可为 0.04, 0.035, 0.03。显然其比规范的值要大多了。到底取多大值合适, 其实关键是实际基础的安全和沉降, 而不是压板的沉降值。而实际基础的沉降是与基础的宽度和埋深有关的, 这种取值方法并不能真正的解决实际基础的沉降, 终究是一个经验值。

(3) 特征值修正时, 对基础宽度的限制也是一个经验的方法。规范规定当基础宽度小于 3 m 时按 3 m 计算, 大于 6 m 时按 6 m 计算。这一考虑的原因应该是对于基础宽度较大时, 可能会产生过大的沉降, 因而当基础宽度大于 6 m 时, 按公式计算所得的承载力可能会引起过大沉降, 因而限制其计算的承载力值过大, 但这种取法也是一种经验, 因为尚不知真实基础的沉降。而当基础小于 3 m 时, 若按实际基础宽度计算时所得到的承载力可能过小, 偏于保守, 因而按 3 m 来计算。因此, 对基础尺寸的限制还是一种经验方法。

由以上的分析可见, 目前权威和相对较完善的规范方法确定地基承载力时尚不够完善, 因为真正的地基承载力应该是针对具体基础, 保证其强度安全和沉降满足上部结构要求, 而目前规范确定的地基承载力方法尚不能完全达到以上的要求。初步的研究表明<sup>[6]</sup>, 目前这种方法对于硬土地基是偏保守的, 未能充分利用地基的承载力, 而对于软土地基则由此确定的承载力是偏大的, 主要是沉降偏大。因此, 合理和科学的地基承载力确定方法应该是针对实际的具体基础的强度安全和沉降控制, 而不是用压板试验直接确定。由于地基的承载力是与基础尺寸有关的, 压板试验确定的承载力不是真正基础下地基的承载力, 由于尺寸效应, 不同基础的承载力都是不同的, 因此, 确定的方法应该是用压板试验求取与尺寸无关的土体强度参数和变形参数, 由所求得的土体参数对实际具体基础计算其  $p-s$  曲线, 由基础的  $p-s$  曲线根据强度安全和沉降要求确定地基承载力。这就是本文提出的地基承载力确定的新方法。

## 2 确定地基承载力的新方法

规范方法采用压板试验直接确定承载力, 这对特定的压板尺寸是合适的, 也比较直观, 但由于地基承

载力不仅取决于土性, 还与基础尺寸和埋深有关, 而工程应用中真正需要的是实际基础下地基的承载力, 因此, 压板试验确定的地基承载力是不能直接用于具体基础的设计的。从以上的分析可见, 目前的这种方法还尚不完善, 因此确定的实际基础的承载力其对应的基础沉降尚不明确的, 这样确定的承载力有可能引起基础沉降过大而不安全, 例如对于高压缩性土, 而对于硬土则可能是保守的。鉴于地基承载力正确确定对地基设计的重要性, 有必要研究正确和更合理的地基承载力确定的新方法。

新的方法是利用压板试验确定土的强度指标和变形参数, 利用切线模量法<sup>[7]</sup>计算具体基础的  $p-s$  曲线, 由  $p-s$  曲线根据强度安全和沉降控制可以很方便的确定满足要求的地基承载力。

具体步骤为

(1) 一般土体的压板载荷试验的  $p-s$  曲线为缓变形曲线, 通常可以假设其符合双曲线方程, 如图 1 和下式所示。

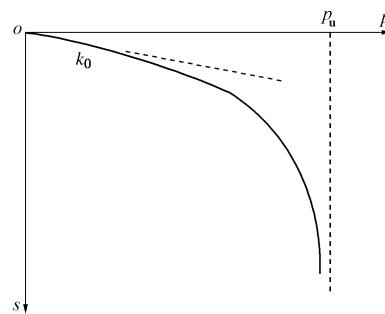


图 1 压板载荷试验曲线

Fig. 1 Curve of plate load test

$$p = \frac{s}{a + bs} \quad . \quad (3)$$

$a, b$  为待定参数, 根据双曲线方程的特点, 可以得到

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{1}{p_u}, \\ a &= \frac{1}{k_0}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$p_u$  为压板试验的地基极限承载力,  $k_0$  为  $p-s$  曲线的初始切线模量。初始状态时的沉降计算可以按弹性力学的 Boussinesq 解计算, 则

$$E_{t0} = k_0 D (1 - \mu^2) \omega \quad , \quad (5)$$

式中,  $E_{t0}$  为土体初始切线模量,  $D$  为压板宽度和直径,  $\mu$  为土体泊松比, 一般土可取  $\mu=0.3$ ,  $\omega$  为压板形状系数, 圆形压板  $\omega=0.79$ , 方形压板  $\omega=0.88$ 。 $p_u$  由压板试验得到, 压板尺寸已知, 当假设土体的内摩擦角  $\varphi$  值后, 则可由地基极限承载力理论公式由  $p_u$  反算土体的

黏聚力  $c$  值, 也可假设  $c$  值, 反算  $\varphi$  值。

这样就可以由压板试验求得土体的  $c$ ,  $\varphi$  和  $E_{t0}$  值, 这是土性指标, 与基础的尺寸无关的。

(2) 由  $c$ ,  $\varphi$ ,  $E_{t0}$  根据切线模量法<sup>[7]</sup>可以求得实际基础的  $p$ - $s$  曲线, 如图 2 所示。

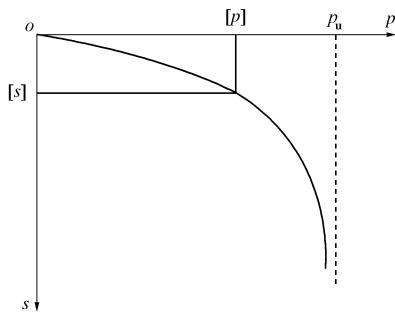


图 2 实际基础的  $p$ - $s$  曲线

Fig. 2  $p$ - $s$  curve of actual foundation

(3) 根据上部结构对基础的沉降要求, 设要求基础沉降不大于  $[s]$ , 则在基础的  $p$ - $s$  曲线上求得对应的沉降为  $[s]$  时的荷载为  $[p]$ , 若  $K = p_u/[p] \geq 2$ , 则当要求地基的强度安全系数为不小于 2 时, 相应的  $[p]$  值即为该基础下的地基承载力, 若  $K$  不满足, 则可以取更小的  $[p]$  值使  $K$  满足, 而此时  $S$  则更小, 必可满足  $s \leq [s]$  的要求。由此可以很直观、方便的获得同时满足强度和沉降要求的真正地基的承载力。

### 3 案 例

#### 3.1 工程概况

东莞某工程, 为了了解地基土的承载力和变形, 在场区内进行了 3 个点的压板载荷试验, 现选取 #1 试验点的结果进行分析。试验的压板直径为 80 cm。试验点的地质情况见图 3, 土层物理力学参数见表 1, 压板试验的  $p$ - $s$  曲线见图 4, 压板试验数据见表 2。

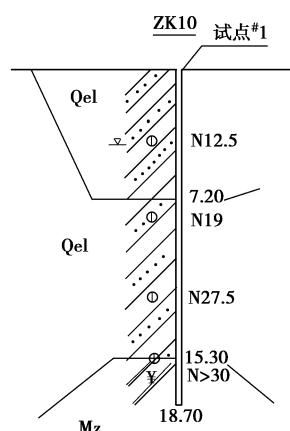


图 3 试验点地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of test point

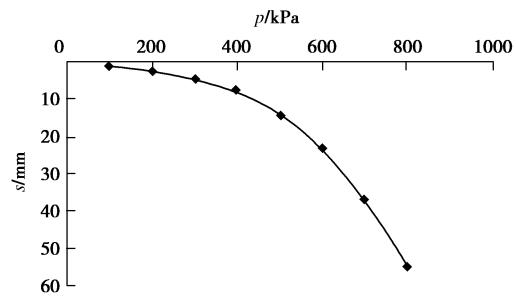


图 4 压板试验  $p$ - $s$  曲线

Fig. 4  $p$ - $s$  curve of plate load test

表 1 试验点土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of test point

编 号	含水 率/%	孔隙 比	塑性 指数	凝 聚 力/kPa	摩 擦 角 $(^{\circ})$	压缩 模量 /MPa	取样 深度 /m	典型 土名	标贯 击数
#1	31.8	1.07	16.7	50	16.6	5.71	1.5	粉质 黏土	11

表 2 压板试验数据

Table 2 Record of plate load test

荷载 /kPa	100	200	300	400	500	600	700	800
沉降 /mm	1.01	2.58	4.51	8.03	14.25	23.44	36.71	54.56

#### 3.2 按照规范方法计算地基的承载力

按照《地基基础设计规范 GB50007—2011》, 当取  $s/b=0.01$  对应的承载力为地基的承载力特征值时,  $s=b \times 0.01=8 \text{ mm}$ , 根据图 4, 则  $f_{ak}=399.14 \text{ kPa} <$  最大试验荷载值 800 kPa 的一半, 因此  $f_{ak}=399.14 \text{ kPa}$ 。假设实际基础宽度  $b=1.5 \text{ m}$ , 基础埋深  $d=2 \text{ m}$ , 根据式(1)对承载力特征值进行深宽修正, 则按地基规范可得地基的承载力为  $f_a=399.14+1.5 \times 20 \times 1.5=444.14 \text{ kPa}$ 。

根据表 1 知, 由室内试验得到的地基土的压缩模量  $E_s=5.71 \text{ MPa}$ 。根据地基基础设计规范, 地基承载力  $f_{ak}=399.14 \text{ kPa}$  时, 该压板尺寸下的地基最终沉降量可按下式计算:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) , \quad (6)$$

具体计算结果见表 3。

表 3 沉降量计算表 (规范方法)

Table 3 Table of deformation calculation

$z_i$ /m	$\bar{\alpha}_i$	$z_i \bar{\alpha}_i -$ $z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$	$E_s$ /MPa	$A_i / E_{si}$	$\Delta s_i$ /mm
0	1	—	—	—	—
0.5	0.849	0.4245	5.71	0.0743	29.6734
1.0	0.615	0.1905	5.71	0.0334	13.3163
1.5	0.4679	0.0869	5.71	0.0152	6.0710
2.0	0.374	0.0462	5.71	0.0081	3.2260
2.5	0.3111	0.0298	5.71	0.0052	2.0796
3.0	0.2656	0.0191	5.71	0.0033	1.3316
3.5	0.2316	0.0138	5.71	0.0024	0.9646
$\sum = 0.8106$				0.1420	56.6625

在上面的地基沉降计算深度范围内已经有  $\Delta s'_n = 0.9646 \text{ mm} \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta s'_i = 1.4165 \text{ mm}$ , 即计算深度已经满足规范要求。

查表得沉降计算经验系数  $\psi_s = 1.1292$ , 故沉降量:  $s = \psi_s \sum_{i=1}^n \Delta s'_i = 1.1292 \times 56.6625 = 63.98 \text{ mm}$ 。

而根据压板试验曲线,  $f_{ak} = 399.14 \text{ kPa}$  所对应的沉降  $s = 8.00 \text{ mm}$ , 远远小于  $63.98 \text{ mm}$ , 因此, 由规范方法计算得到的沉降与试验结果差距很大。

### 3.3 按照本文方法计算地基的承载力

(1) 采取双曲线形式对以上压板试验数据进行拟合, 拟合得到  $\frac{s}{p} = 0.0013s + 0.0089$  由此可得  $a = 0.0089$ ,

$$b = 0.0013, \quad p_u = \frac{1}{b} = 769.23 \text{ kPa}, \quad E_{t0} = \frac{D(1-\mu^2)\omega}{a} = \frac{0.8 \times (1-0.3^2) \times 0.79}{0.0089} = 64.62 \text{ MPa}.$$

根据 Terzaghi 公式  $p_u = cN_c + \gamma_0 dN_q + \frac{1}{2}\gamma bN_r$ , 对于本工程  $\gamma_0 = \gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , 假设  $\varphi = 20^\circ$ , 则  $N_r = 4.0$ ,  $N_q = 7.44$ ,  $N_c = 17.7$ , 对于压板试验  $b = 0.8 \text{ m}$ ,  $d = 0 \text{ m}$ , 将  $p_u = 769.23 \text{ kPa}$  及以上数据带入 Terzaghi 公式, 则反算得到  $c = 41.65 \text{ kN}$ 。

由此, 得到计算所需的 3 个土力学参数,  $c = 41.65 \text{ kN}$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $E_{t0} = 64.62 \text{ MPa}$ 。

根据以上数据, 采用切线模量法<sup>[7]</sup>计算压板尺寸下的  $p - s$  曲线, 并与原压板试验曲线相比较, 如图 5。

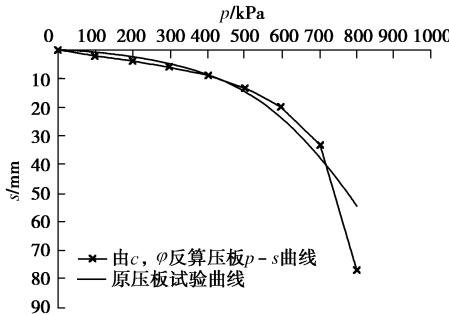


图 5 压板计算曲线与试验曲线的比较

Fig. 5 Comparison between curve of plate load test and calculation

由图 5 可以看出, 由反算得到的  $c$ ,  $\varphi$ ,  $E_{t0}$  计算压板尺寸下地基的  $p - s$  曲线与原压板试验曲线比较接近, 说明反算得到的  $c$ ,  $\varphi$ ,  $E_{t0}$  值是合适的, 切线模量法计算的沉降是可靠的, 由此得到的沉降值比规范方法要准确。

(2) 采用切线模量法<sup>[7]</sup>计算实际基础的  $p - s$  曲线。假设实际基础宽度  $b = 1.5 \text{ m}$ , 基础埋深  $d = 2 \text{ m}$ 。假设每级荷载增量为  $100 \text{ kPa}$ , 也即  $\Delta p = 100 \text{ kPa}$ , 分层

厚度  $\Delta h = 0.5 \text{ m}$ , 取每层土中心点位置进行计算, 计算深度  $h$  取  $20 \text{ m}$ , 故可分 40 层, 以第一级荷载为例说明计算过程。

第一级荷载下, 第一层土计算深度为  $z_1 = 0.25 \text{ m}$ , 附加应力系数  $K_c = 0.97576$ , 则该深度处附加应力:

$$\Delta\sigma = 100 \times 0.97576 = 97.576 \text{ kPa}, \quad p_u = cN_c + \gamma_0 dN_q + \frac{1}{2}\gamma bN_r = 41.65 \times 17.7 + 20 \times 2.25 \times 7.44 + 0.5 \times 20 \times 1.5 \times 4 = 1132.01 \text{ kPa}, \quad E_{t1} = (1 - R_f) \frac{p}{p_u}^2 \times E_{t0} = (1 - 1 \times \frac{97.576}{1132.01})^2 \times 64.62 = 53.96 \text{ MPa}.$$

则第一层的沉降:

$$\Delta s_1 = \frac{\Delta\sigma_1 \times \Delta h}{E_{t1}} = \frac{97.576 \times 0.5}{53.96} = 0.9041 \text{ mm}.$$

第二层土计算深度为  $z_2 = 0.5 \text{ m}$ , 附加应力系数  $K_c = 0.7009$ , 则该深度处附加应力:  $\Delta\sigma = 100 \times 0.7009 = 70.09 \text{ kPa}$ ,  $p_u = 41.65 \times 17.7 + 20 \times 2.75 \times 7.44 + 0.5 \times 20 \times 1.5 \times 4 = 1206.41 \text{ kPa}$ ,  $E_{t2} = (1 - 1 \times \frac{70.09}{1206.41})^2 \times 62.64 = 57.329 \text{ MPa}$ 。

则第二层的沉降:

$$\Delta s_2 = \frac{\Delta\sigma_2 \times \Delta h}{E_{t2}} = \frac{70.09 \times 0.5}{57.329} = 0.6112 \text{ mm}$$

.....

以此类推, 可求得每一层土的沉降值, 将每一层土的沉降值叠加, 最终求得第一级荷载下土体的最终沉降值:

$$s_1 = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 + \dots + \Delta s_{40} = 2.7810 \text{ mm}.$$

重复以上过程, 可求得每级荷载下的沉降值, 根据计算结果绘制实际基础下的沉降曲线  $p - s$ , 见图 6。

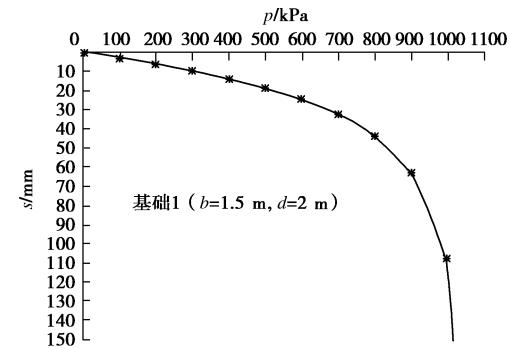


图 6 基础 1 的  $p - s$  曲线 ( $b = 1.5$ ,  $d = 2$ )

Fig. 6  $p - s$  curve of first foundation ( $b = 1.5$ ,  $d = 2$ )

(3) 对基础宽度  $b = 1.5 \text{ m}$ , 基础埋深  $d = 2 \text{ m}$  的情况,  $p_u = cN_c + \gamma_0 dN_q + \frac{1}{2}\gamma bN_r = 1094.8 \text{ kPa}$ , 当安全系数取为 2 时, 可取承载力为  $547.4 \text{ kPa}$ , 此时, 由图 6 可知基础的沉降为  $21.38 \text{ mm}$ , 因此, 当要求基础沉降  $[s] \leq 25 \text{ mm}$ , 安全系数  $[K] \geq 2.0$  时, 由此方法获得

的地基承载力可同时满足安全系数与沉降的要求。而按规范确定的地基承载力为 444 kPa, 其对应的安全系数为 2.47, 若按规范方法计算的沉降为 127.35 mm, 比按新方法得到的沉降 15.6 mm 大很多。其他的比较如表 4 所示。表 4 中的沉降是按新方法确定的。由表 4 可见, 新的方法在满足安全和沉降要求的条件下可以得到比规范更高的地基承载力, 既科学合理又直观可靠。

为了分析该方法的合理性, 进一步比较不同基础尺寸时的地基承载力和沉降情况 ( $b$  为基础宽度,  $d$  为基础埋深), 分别采用规范方法与本文所提出的新方法进行了计算, 而沉降则是按新方法确定的。

基础 1:  $b=1.5 \text{ m}$  ( $0 \text{ m} < b < 3 \text{ m}$ ),  $d=2 \text{ m}$ , 计算结果见图 6 和表 4;

基础 2:  $b=4.5 \text{ m}$  ( $3 \text{ m} < b < 6 \text{ m}$ ),  $d=2 \text{ m}$ , 计算结果见图 7 和表 5;

基础 3:  $b=8 \text{ m}$  ( $b > 6 \text{ m}$ ),  $d=2 \text{ m}$ , 计算结果见图 8 和表 6。

表 4 不同方法计算结果对比 ( $b=1.5 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

Table 4 Comparison of calculated results of different methods  
( $b=1.5 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

方法	$f_{ak}$ /kPa	$f_a$ /kPa	$p_u$ /kPa	安全 系数 $k$	沉降 s/mm
规范法 $s/b=0.01$	399.14	444.14	1094.8	2.47	15.64
新方法	—	547.4	—	2.00	21.38

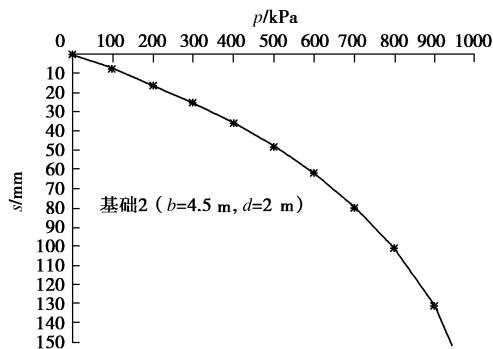


图 7 基础 2 的  $p$ - $s$  曲线 ( $b=4.5 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

Fig. 7  $p$ - $s$  curve of second foundation ( $b=4.5 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

表 5 不同方法计算结果对比 ( $b=4.5 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

Table 5 Comparison of calculated results of different methods  
( $b=4.5 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

方法	$f_{ak}$ /kPa	$f_a$ /kPa	$p_u$ /kPa	安全系 数 $K$	沉降 s/mm
规范法 $s/b=0.01$	399.14	453.14	—	2.68	42.38
新方法	—	607.4	1214.8	2.00	63.43

对于以上 3 个基础的承载力可做以下分析:

对于基础 1, 由以上分析可以获得比现有规范更高的地基承载力。

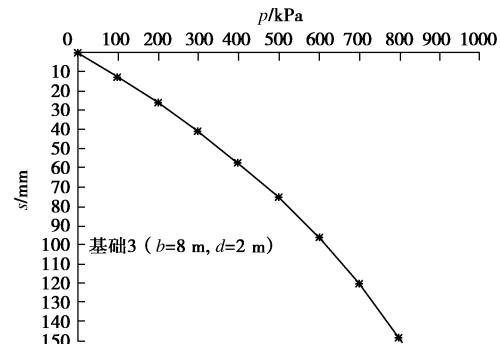


图 8 基础 3 的  $p$ - $s$  曲线 ( $b=8 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

Fig. 8  $p$ - $s$  curve of third foundation ( $b=8 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

表 6 不同方法计算结果对比 ( $b=8 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

Table 6 Comparison of calculated results of different methods  
( $b=8 \text{ m}$ ,  $d=2 \text{ m}$ )

方法	$f_{ak}$ /kPa	$f_a$ /kPa	$p_u$ /kPa	安全系数 $K$	沉降 s/mm
规范法 $s/b=0.01$	399.14	462.14	—	2.93	68.3
新方法	—	677.4	1354.8	[ $K$ ]=2.00 7.02	114.25 [ $s$ ]=25.0

对于基础 2, 显然, 当取安全系数为 2 时, 基础沉降达 63.43 mm, 对于规范方法, 经基础的深宽修正后为 453 kPa, 安全系数为 2.68, 对应沉降为 43.38 mm, 如果要求基础的沉降不大于 25 mm, 安全系数大于 2, 则地基的承载力由图 7 可见只能取为 295 kPa, 此时的安全系数为 4, 如果基础允许沉降为 50 mm, 则地基的承载力可以取为 490 kPa, 此时地基强度的安全系数为 2.48, 这样, 地基的承载力是由沉降控制确定的。新的方法可以直接由基础的  $p$ - $s$  曲线根据双控原则确定, 直观、方便、科学合理。规范方法把承载力和沉降确定方法分离, 不够方便, 并且对这种地基规范方法计算的沉降是偏大较多的。

对于基础 3, 即使按规范的方法得到的地基承载力 462 kPa, 其沉降已达 68 mm, 如果按控制基础的沉降为 25 mm, 则根据基础的  $p$ - $s$  曲线, 地基的承载力约为 193 kPa, 此时地基的安全系数大于 7, 承载力要远小于规范的修正特征值, 这种情况地基的承载力是由基础的沉降来决定的, 因此, 即使在计算其修正值时限制了基础的宽度, 承载力对应的沉降还是偏大, 如采用规范方法计算的沉降更大。如果沉降允许 100 mm, 则由图 8 可见, 地基承载力可取 610 kPa, 此时的安全系数为 2.20, 如果沉降允许 50 mm, 则承载力可取为 360 kPa, 安全系数为 3.76。这说明对于大尺

寸的基础, 地基的承载力主要是由沉降控制确定, 规范方法即使在计算特征值的修正值时限制基础尺寸不大于6 m, 但这样得到的地基承载力对应的沉降仍会偏大, 并且规范方法计算的沉降会更大, 而本文方法由基础的  $p-s$  曲线即可以很方便的根据结构对基础的沉降和强度要求的条件来确定合理的承载力, 并且沉降计算结果会更符合实际。

由此可见, 合理的地基承载力应要根据实际基础的尺寸, 由承载力的安全性和基础的沉降来确定才是科学合理的, 目前规范方法虽然为控制基础过大的沉降采用限制基础尺寸来进行承载力的修正, 但这种修正并不能保证可以满足要求。合理的方法是根据基础的  $p-s$  曲线来确定, 这种方法既科学合理又直观可靠。

## 4 结 论

(1) 地基的承载力除与土性有关以外, 还与基础的尺寸、埋深和沉降要求有关的, 合理的地基承载力确定方法应是根据实际基础的  $p-s$  曲线, 由地基的安全系数和沉降要求来确定, 这样既科学合理又直观可靠。

(2) 原位压板载荷试验被人们认为是确定地基承载力最可靠的方法, 但如何更好的利用这一试验来更科学合理的确定地基承载力还没有很好地解决。通常直接由压板试验来定出所谓的特征值, 然后再根据具体基础的尺寸进行修正的方法并不够完善。本文提出利用压板试验确定土的强度参数和变形指标, 然后用切线模量法计算具体基础的  $p-s$  曲线, 由此曲线根据地基的安全要求和沉降要求双控的原则确定地基承载力的新方法, 可为合理确定地基承载力提供新的途径, 对推动地基设计理论与方法的发展将会有很好的作用。

## 参考文献:

- [1] 约瑟夫·E·波勒斯. 基础工程分析与设计[M]. 5 版. 童小东, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (JOSEPH E Bowles.
- Foundation analysis and design[M]. 5th ed. TONG Xiao-dong, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 黄熙龄, 秦宝玖, 等. 地基基础的设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. (HUANG Xi-ling, QIN Bao-jiu, et al. Design and calculation of building foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981. (in Chinese))
- [3] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2012. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [4] DBJ15—31—2003 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (DBJ15—31—2003 Design code for building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 宰金珉, 翟洪飞, 周 峰, 等. 按变形控制确定中、低压缩性地基土承载力的研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 72 - 80. (ZAI Jin-min, ZHAI Hong-fei, ZHOU Feng, et al. Determination of the bearing capacity of soil foundation in medium and low compressive soils using deformation control[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 72 - 80. (in Chinese))
- [6] 杨光华, 王恩麒. 基础宽度对地基承载力影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 383 - 392. (YANG Guang-hua, WANG En-qi. Numerical analysis of width of foundation effect on the bearing capacity of soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 383 - 392. (in Chinese))
- [7] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927 - 1931. (YANG Guang-hua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1927 - 1931. (in Chinese))