

DOI: 10.11779/CJGE2019S1002

# 强度和变形双控条件下基础尺寸的设计及优化

杨光华<sup>1, 2, 3</sup>, 孙树楷<sup>1</sup>, 刘清华<sup>1</sup>, 贾 恺<sup>2, 3</sup>, 姜 燕<sup>2, 3</sup>

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

**摘要:** 新的地基设计理论提出了依据基底荷载与沉降的  $p-s$  曲线, 按照强度和变形双控的原则进行基础设计, 但不同的基础尺寸其对应的  $p-s$  曲线也是不同的, 如何依据基底荷载与沉降的  $p-s$  曲线确定基础的合理尺寸, 以满足地基强度和变形双控的原则, 这是一个很具体和有意义的工作。本文基于原位压板试验的  $p-s$  曲线反算出土体参数, 然后采用切线模量法计算出不同基础宽度的  $p-s$  曲线, 通过沉降要求和地基强度安全系数要求得到不同尺寸下基础对应的地基承载力, 然后根据基底压力确定满足强度和变形要求的最小基础尺寸, 并通过案例将该方法与现行规范方法进行比较, 说明该方法的合理性。

**关键词:** 原位压板载荷试验; 地基承载力; 切线模量法; 基础底面尺寸;  $p-s$  曲线

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)S1-0005-04

**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: 1084242143@qq.com。

## Design and optimization of foundation sizes under dual control conditions of strength and deformation

YANG Guang-hua<sup>1, 2, 3</sup>, SUN Shu-kai<sup>1</sup>, LIU Qing-hua<sup>1</sup>, JIA Kai<sup>2, 3</sup>, JIANG Yan<sup>2, 3</sup>

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

**Abstract:** The new foundation design theory proposes a method for foundation design based on the  $p-s$  curves of base load and settlement with the principle of dual control conditions of strength and deformation. However, the corresponding  $p-s$  curves of different foundation sizes are also different. How to determine the reasonable sizes of the foundation according to the  $p-s$  curves of base load and settlement to meet the principle of dual control conditions of foundation strength and deformation is a very specific and meaningful work. The soil parameters are calculated based on the  $p-s$  curves of the in-situ plate loading tests. Then, the  $p-s$  curves of different foundation widths are calculated by the tangent modulus method, and the bearing capacities corresponding to different foundation sizes are obtained by the requirements of settlement and safety factor of foundation strength. Finally, combined with the foundation pressure to determine the minimum foundation size that meets the strength and deformation requirements, the proposed method is compared with the current codes of China through cases, which shows the rationality of this new method.

**Key words:** in-situ plate loading test; foundation bearing capacity; tangent modulus method; foundation size;  $p-s$  curve

## 0 引言

关于浅基础的设计, 是基础工程中一个基本的问题, 目前规范<sup>[1-2]</sup>给出的浅基础的设计方法均是通过上部荷载和承载力特征值来确定基础底面积, 再通过沉降要求来进行验算。这些设计方法以满足强度来控制基础底面积, 再进行沉降验算。传统方法比较困难的地方在于沉降难以计算准确, 而地基承载力特征值又与沉降控制有关, 以致实际中地基承载力特征值都难

以严格准确的确定, 极大的影响地基设计的科学性。例如认为用现场压板载荷试验确定地基承载力是最可靠的方法, 但通常较多情况的地基承载力特征值是取压板试验沉降曲线的沉降比为  $s/b=0.01\sim 0.015$  所对应的压力值<sup>[1]</sup>, 这个沉降比不是一个定值, 是一个范围

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778152); 广东省水利科研及技术推广项目(2005-06)

收稿日期: 2019-04-28

值, 这样有可能同一个试验曲线, 不同的人取不同的沉降比对应得到的承载力特征值就会不同。同时, 这个沉降比不同的规范也可能不同, 例如国家标准<sup>[1]</sup>的沉降比为 0.01~0.015, 而广东省的地基规范<sup>[2]</sup>则取为 0.015~0.02。因此, 如何合理确定地基承载力的问题其实目前还没有很好解决的。

为此, 新的地基设计方法提出采用原位压板试验获取土层强度参数和变形参数, 而不是直接用压板试验确定地基的承载力。以压板试验得到的土层参数用切线模量法来计算实际基础的  $p-s$  曲线, 根据实际基础的沉降控制和地基强度安全系数要求双控原则, 确定地基允许承载力, 既保证了地基强度安全, 又保证了基础沉降要求, 这才是正确合理的地基设计方法。

新的地基设计理论<sup>[3-4]</sup>提出了依据基础荷载与沉降的  $p-s$  曲线, 按照强度和变形双控原则进行基础设计<sup>[5]</sup>。在基础设计时, 基础底面尺寸需要通过  $p-s$  曲线求出, 但不同基础尺寸对应的  $p-s$  曲线是不同的, 在基础底面尺寸未知情况下无法得到确定的  $p-s$  曲线。因此, 如何在基础底面尺寸未知情况下依据基底荷载与沉降的  $p-s$  曲线来确定基础的合理尺寸, 以满足地基强度和变形双控的原则, 这是一个很有意义同时还有待解决的问题。为此, 基于新的地基设计理论, 我们确定满足强度要求的地基承载力和满足沉降要求的地基承载力, 再根据不同基础底面尺寸下对应的基底压力, 确定出满足强度要求和变形要求的最小基础底面尺寸, 解决了新方法确定最优化的基础底面尺寸问题, 并与传统方法进行比较, 说明新方法更科学合理。

## 1 依据切线模量法进行基础尺寸设计

由于地基承载力与沉降计算都与基础尺寸有关, 而基础尺寸又是设计要求解的, 这可能需要不断的试算。为此提出以下解决的方法。

(1) 求出不同基础尺寸满足强度要求的地基承载力, 建立基础尺寸宽度  $b$  与地基承载力关系  $b-f_{ak}$ 。

(2) 依据切线模量法计算不同基础尺寸对应的基底压力与沉降的曲线, 得到满足沉降要求的不同基础尺寸对应的地基承载力, 建立基础宽度与满足沉降要求的地基承载力关系  $b-f_{as}$ 。

(3) 计算不同基础尺寸对应的基础基底压力  $p_k$ , 建立基底压力与基础尺寸关系  $b-p_k$ 。

(4) 确定最优基础尺寸。根据以上结果, 可以作出基础宽度与基底压力、强度承载力及变形承载力的关系曲线, 如图1所示。由图1, 当基底压力  $p_k$  等于按变形控制允许的基底压力  $f_{as}$ , 同时小于强度允许的压力  $f_{ak}$ , 对应的基础宽度  $b_m$  即为确定的最优基础尺寸。

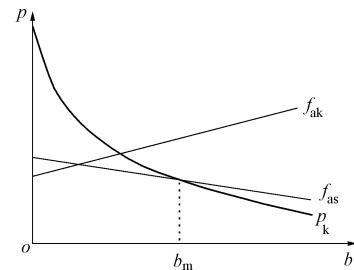


图 1 不同条件下基底压力与基础宽度关系

Fig. 1 Relationship between foundation pressure and foundation width under different conditions

## 2 工程案例

### 2.1 工程概况

以东莞莞城工程为案例<sup>[4]</sup>, 针对某一柱下基础进行设计, 上部荷载为 5000 kN, 沉降要求  $s \leq 40 \text{ mm}$ , 在场区内选择 3 个点进行压板载荷试验, 选取 #1 试验点的试验结果进行分析设计。该点地质剖面图如图2所示, 物理力学参数如表1所示, 压板直径为 0.8 m, 压板载荷试验曲线如图3所示, 压板试验数据如表2所示。

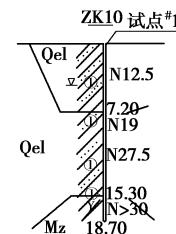


图 2 地质剖面图

Fig. 2 Geological profile

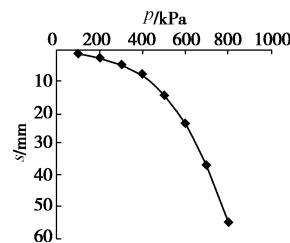


图 3  $p-s$  曲线

Fig. 3  $p-s$  curve

表 1 #1 试验点土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of test point

| 编号 | 塑性指数 | 黏聚力 /kPa | 摩擦角 / $^{\circ}$ | 压缩模量 /MPa | 取样深度 /m | 典型土名 | 标贯击数 |
|----|------|----------|------------------|-----------|---------|------|------|
| #1 | 16.7 | 50       | 16.6             | 5.71      | 1.5     | 粉质黏土 | 11   |

表 2 压板试验数据

Table 2 Records of plate load tests

| $p/\text{kPa}$ | 100  | 200  | 300  | 400  | 500   | 600   | 700   | 800   |
|----------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| $s/\text{mm}$  | 1.01 | 2.58 | 4.51 | 8.03 | 14.25 | 23.44 | 36.71 | 54.56 |

## 2.2 按照规范方法设计

第一步, 进行地基承载力验算。按照《地基基础设计规范GB50007—2011》<sup>[1]</sup>, 地基承载力特征值可取沉降比 $s/b=0.01\sim 0.015$ 所对应的压力值, 并小于最大试验荷载值的一半, 为此取 $s/b=0.01$ 对应的承载力为地基的承载力特征值时,  $s=8 \text{ mm}$ , 根据图3, 则 $f_{ak}=399.14 \text{ kPa} <$ 最大试验荷载值 $800 \text{ kPa}$ 的一半, 因此地基承载力特征值 $f_{ak}=399.14 \text{ kPa}$ 。设基础埋深 $d=2 \text{ m}$ , 先对地基承载力特征值进行深度修正, 则按地基规范可得地基修正后的承载力特征值为 $f_a=444.14 \text{ kPa}$ ,  $b=\sqrt{F_k/f_a-\gamma_G d}=3.52 \text{ m}$ , 取 $b=4 \text{ m}$ , 宽度修正后承载力特征值 $f_a=450.14 \text{ kPa}$ 。膜 $p_k=(F_k+G_k)/A=352.5 \text{ kPa} < f_a$ , 故当 $b \geq 4 \text{ m}$ , 地基强度承载力满足要求。

第二步, 进行沉降验算。采用分层总和法, 查表知沉降经验系数 $\psi_s=0.865$ , 该基础尺寸下地基最终沉降量 $s=\psi_s \sum_{i=1}^n p_0/E_{si} \cdot (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1})=159.5437 \text{ mm}$ , 大于 $40 \text{ mm}$ , 不满足沉降要求, 需加大基础底面尺寸。经过试算, 得到不同基础尺寸下沉降如表3所示。

表3 不同基础宽度下的沉降

Table 3 Settlements under different foundation widths

| $b/\text{m}$  | 5      | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $s/\text{mm}$ | 119.29 | 95.43 | 78.91 | 68.42 | 59.13 | 50.70 | 45.05 | 40.45 | 35.77 |

由表3可知, 当 $b \geq 13 \text{ m}$ 时, 沉降满足小于 $40 \text{ mm}$ 的要求, 地基沉降满足要求。

该计算过程存在反复验算过程, 若不满足沉降要求, 则需扩大基础底面积, 再进行沉降计算, 且把地基承载力与沉降计算分离计算, 无法直观明了地得到基础宽度、地基承载力与沉降的关系。

## 2.3 按新方法进行设计

新方法根据压板试验求得地基强度和变形参数, 然后用切线模量法计算基础的荷载与沉降关系曲线 $p-s$ 曲线, 根据 $p-s$ 曲线由强度和变形双控确定合理的基础尺寸。具体做法如下:

(1) 由压板试验求地基土的强度和变形参数。根据切线模量法, 假设压板的荷载与沉降曲线符合双曲线, 由压板试验拟合可得,  $s/p=a+bs=0.011+0.0011$ 。故 $a=0.011$ ,  $b=0.0011$ ,  $p_u=909.09 \text{ kN}$ , 得到土的初始切线模量:  $E_{t0}=D(1-\mu^2)\omega/a=52.28364$ , 假设 $\varphi=20^\circ$ , 根据Terzaghi承载力公式 $P_u=cN_c+\gamma_0 dN_q+0.5\gamma bN_r$ , 查表可得 $N_r=4$ ,  $N_q=7.44$ ,  $N_c=17.7$ , 反算出黏聚力 $c=49.55316$ 。

(2) 求出不同基础尺寸的基底压力 $p_k$ 与强度控制承载力 $f_{ak}$ 。假设基础埋深 $2 \text{ m}$ , 假定不同基础的宽度, 为简便, 按方形基础计算不同基础宽度的地基极

限承载力, 地基强度允许承载力取安全系数为2, 同时求得不同基础宽度下对应的基底压力。比如, 假定 $b=2 \text{ m}$ ,  $p_k=F_k/A+\gamma d=5000/2^2+20 \times 2=1290 \text{ kPa}$ ,  $f_{ak}=p_u/K=(cN_c+\gamma_0 dN_q+0.5\gamma bN_r)/K=627 \text{ kPa}$ 。

显然,  $p_k > f_{ak}$ , 不满足强度要求, 应将基础进一步扩大。将不同基础尺寸下的强度控制的允许承载力、基底压力列于表4。由表4可见, 基础宽度大于 $3 \text{ m}$ 时, 地基强度允许承载力大于基底压力, 满足要求。

表4 不同基础尺寸下基底压力与强度控制承载力

Table 4 Foundation pressures and strength-control bearing capacities under different foundation sizes

| $b$                 | 2.0  | 2.5 | 3.0   | 3.5 | 4.0   | 4.5   | 5.0 | 5.5 | 6.0   |
|---------------------|------|-----|-------|-----|-------|-------|-----|-----|-------|
| $p_k/\text{kPa}$    | 1290 | 840 | 595.6 | 448 | 352.5 | 286.9 | 240 | 205 | 178.9 |
| $f_{ak}/\text{kPa}$ | 627  | 637 | 647   | 657 | 667   | 677   | 687 | 697 | 707   |

(3)用切线模量法计算不同基础的荷载与沉降曲线。根据前面求得的土体参数 $c$ ,  $\varphi$ ,  $E_{t0}$ 及切线模量法, 求出各基础尺寸下的 $p-s$ 曲线, 这里基础尺寸的增量仍为 $0.5 \text{ m}$ 。我们以基础尺寸 $b=2 \text{ m}$ , 在第一级增量 $p=100 \text{ kN}$ 下的 $p-s$ 曲线计算为例。设每级荷载增量为 $100 \text{ kPa}$ , 分层厚度为 $0.5 \text{ m}$ , 计算深度 $h$ 取 $20 \text{ m}$ , 埋深 $2 \text{ m}$ 。计算过程中, 计算深度 $h$ 取 $20 \text{ m}$ 大于 $2$ 倍最大基础宽度, 且最后一层土沉降均满足 $\Delta s \leq 0.025s$ , 计算深度满足要求。

第一层土: 计算深度 $z_1=0.25 \text{ m}$ , 对应的附加应力系数 $K_c=0.98916$ , 该深度处附加应力 $\sigma_1=98.916 \text{ kPa}$ , 根据Terzaghi承载力公式 $P_{u1}=1291.90 \text{ kPa}$ ,  $E_{t1}=\left(1-R_f \frac{\sigma_1}{p_u}\right)^2 \times E_{t0}=44.5838$ ,  $\Delta s_1=\Delta \sigma_1 \times \Delta h/E_{t1}=1.1093 \text{ mm}$ 。

依次计算各层土的沉降, 可得基础尺寸 $b=2 \text{ m}$ 在第一级增量 $p=100 \text{ kN}$ 下的最终沉降量 $s=\Delta s_1+\Delta s_2+\dots+\Delta s_{40}=4.4707 \text{ mm}$ 。重复以上步骤, 计算出每级荷载下的最终沉降量, 可得 $b=2 \text{ m}$ 对应的 $p-s$ 曲线。同理可得不同基础宽度对应的 $p-s$ 曲线, 取不同基础尺寸对应沉降小于 $45 \text{ mm}$ 的 $p-s$ 曲线如图4所示。

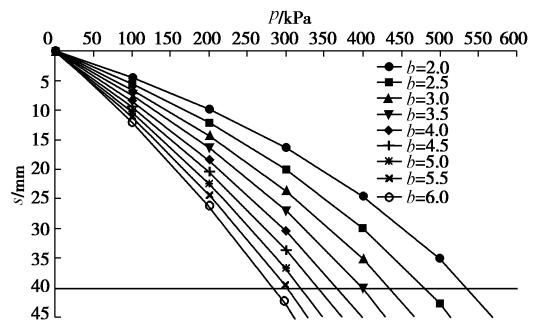


图4 不同基础尺寸下的 $p-s$ 曲线

Fig. 4  $p-s$  curves under different foundations sizes

由图4, 当沉降要求为 $[s] \leq 40 \text{ mm}$ 时, 由 $p - s$ 曲线可得到不同基础尺寸对应的由变形控制的承载力 $f_{as}$ , 比如当基础尺寸 $b=2 \text{ m}$ , 其变形控制承载力为532 kPa, 将不同基础尺寸下按变形控制确定的承载力 $f_{as}$ 、基底压力 $p_k$  (不考虑基础及上覆土自重) 列于表5。

表 5 不同基础尺寸下基底压力与变形控制承载力

Table 5 Foundation pressures and deformation-control bearing capacities under different foundation sizes

| $b$                   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5 | 6     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| $p_k / \text{kPa}$    | 1250  | 800   | 545.6 | 408   | 312.5 | 246.9 | 200   | 165 | 138.9 |
| $f_{as} / \text{kPa}$ | 533.2 | 478.2 | 432.3 | 398.2 | 365.4 | 339.5 | 318.5 | 301 | 283.5 |

由表5可见, 按变形控制基础宽度4 m时, 变形控制允许的承载力 $f_{as}=365.4 \text{ kPa}$ , 已大于基底压力 $p_k=312.5 \text{ kPa}$ 。而由表4, 此时的强度控制承载力 $f_{ak}=667 \text{ kPa}$ , 强度控制承载力和变形控制承载力均大于基底压力, 可以满足要求。由表4, 5制图, 可得到不同基础尺寸下基底压力 (不考虑基础及上覆土自重) 、强度控制承载力、变形控制承载力关系, 如图5所示。由图5可直观看出, 强度控制的承载力大 $f_{ak}$ 大于变形控制的承载力 $f_{as}$ 。若要满足基底压力小于强度承载力与变形控制承载力, 即 $p_k \leq f_{ak}$ ,  $p_k = f_{as}$ , 则 $b=3.6 \text{ m}$ , 即最优化的基础尺寸为3.6 m。

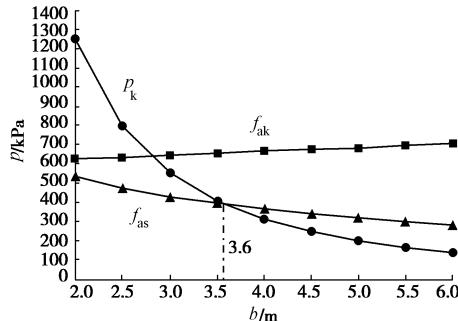


图 5 基底压力、强度控制承载力及变形控制承载力关系

Fig. 5 Relationship among strength-control bearing capacity, deformation-control bearing capacity and foundation pressure

当取基础宽度为3.6 m时, 采用新方法计算出其对应的基底压力 $p_k$ , 地基变形控制承载力 $f_{as}$ , 验证可得基底压力约等于地基变形控制承载力, 故当取基础宽度为3.6 m时, 满足强度和变形控制的要求。

由以上设计结果可知, 若按规范法进行设计, 则基础宽度至少为13 m才能满足设计要求, 而若按新方法进行设计, 基础宽度只需3.6 m就能满足强度和沉降的要求, 大大节省了造价。造成差异性大主要是沉降计算差异大, 规范法计算沉降以室内压缩模量计算乘以经验系数修正, 误差大, 切线模量法以现场原位压板试验求取变形计算参数, 结果比较符合实际。这也

是广东、深圳地基规范<sup>[2, 6]</sup>对残积土这种结构性强的地基沉降建议采用压板试验求取变形模量用于计算沉降的原因。

### 3 结 论

(1) 规范法由于沉降计算的误差较大, 用于变形控制设计会有较大的误差, 结果可能是不合理的。

(2) 新的地基设计理论提出用强度和变形双控原则来确定地基承载力并采用切线模量法计算基础的沉降, 可得到比较符合实际的结果, 也是地基设计的发展方向。本文提出了解决新方法如何确定基础底面最优尺寸的方法, 可使新的地基设计理论可以更好的应用于工程实践。

### 参 考 文 献:

- [1] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 2012. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2012. (in Chinese))
- [2] DBJ15—31—2016 广东省地方标准. 建筑地基基础设计规范 [S]. 2016. (DBJ15—31—2016 The local standards of Guangdong province. Design code for building foundation[S]. 2016. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 杨光华, 姜 燕, 张玉成, 等. 确定地基承载力的新方法 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 597 – 603. (YANG Guang-hua, JIANG Yan, ZHANG Yu-cheng, et al. New method for determination of bearing capacity of soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 597 – 603. (in Chinese))
- [5] 杨光华, 黄致兴, 姜 燕, 等. 地基承载力确定的双控方法 [J]. 岩土力学, 2016(增刊 2): 323 – 242. (YANG Guang-hua, HUANG Zhi-xing, JIANG Yan, et al. Double controlling method for determining bearing capacity of foundation soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S2): 323 – 242. (in Chinese))
- [6] SJG 01—2010 地基基础勘察设计规范 [S]. 2010. (SJG 01—2010 Code for investigation and design of foundation[S]. 2010. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)