

确定地基承载力的 $p-s$ 曲线法

杨光华

(广东省水利水电科学研究院/广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610)

摘要: 地基承载力是土力学的基本问题, 也是土力学创立近百年还没有解决好的一个难题。目前认为确定地基承载力最可靠的方法是压板载荷试验, 但压板载荷试验存在尺寸效应, 其确定的地基承载力一般只保证地基的强度要求, 并不能保证实际基础的变形要求。最好的方法是用实际基础的荷载沉降 $p-s$ 曲线来确定地基的承载力, 由实际基础的 $p-s$ 曲线可以同时获得满足强度和变形双控要求的地基承载力, 这就必须要解决实际基础的 $p-s$ 曲线的计算问题。压板载荷试验是最接近基础实际受力状态的试验, 探索通过压板载荷试验的 $p-s$ 曲线去计算实际基础的荷载沉降 $p-s$ 曲线的方法是解决的途径。文中分析了直接用压板试验确定地基承载力的不足和困难, 通过假设压板试验的 $p-s$ 曲线符合双曲线, 则可由压板试验的 $p-s$ 曲线确定土层的初始切线模量 E_0 和地基的强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 在已知土层的变形和强度指标参数 E_0 、 c 、 φ 后, 即可用切线模量法计算实际基础的荷载沉降 $p-s$ 曲线, 为破解地基承载力确定的难题提供了有效的方法。

关键词: 地基承载力; 压板载荷试验; 荷载沉降 $p-s$ 曲线; 切线模量法; 尺寸效应

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0091-08

Determining foundation bearing capacity of $p-s$ curve method

YANG Guang-hua

(Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower/

The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, Guangdong, China)

Abstract: Foundation bearing capacity is not only a basic problem of soil mechanics, but also a difficult problem that has not been solved in the past hundred years. At present, it is considered that the most reliable method to determine the bearing capacity of foundation is plate load test. However, size effect exists in plate load test. The bearing capacity of foundation determined by plate load test can only meet the strength requirement of foundation, but not the deformation requirement of actual foundation. The best method is to determine the bearing capacity of the foundation by using the $p-s$ curve of load settlement of real foundation. Based on the $p-s$ curve of the actual foundation, the bearing capacity of the foundation can be obtained simultaneously to meet the requirements of both strength and deformation control. Therefore, the calculation problem of $p-s$ curve of the actual foundation must be solved. The stress state in plate load test is the closest to the real stress state of the foundation. So it provides a good solution to explore the method of calculating the load settlement $p-s$ curve of the actual foundation through the $p-s$ curve of plate load test. In this paper, the deficiencies and difficulties of determining bearing capacity of foundation by plate load test are analyzed. Assuming that the $p-s$ curve of the plate load test is hyperbolic, the initial tangent modulus E_0 , cohesion c and internal friction angle φ of the soil layer can be determined from the $p-s$ curve of the plate load test. After the deformation and strength index parameters E_0 , c and φ of the soil layer are known, the tangent modulus method can be used to calculate the $p-s$ curve of load settlement of the actual foundation, which provides an effective method to solve the problem of determining the bearing capacity of foundation.

Key words: foundation bearing capacity; plate load test; load settlement $p-s$ curve; tangent modulus method; size effect

收稿日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078143)。

作者简介: 杨光华 (1962—), 男, 广东罗定人, 博士, 教授级高级工程师, 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。

0 引言

地基承载力的确定是土力学的基本问题,自1925年 Terzaghi 创立土力学到目前已近百年,但如何科学合理确定地基的承载力仍是一个未能很好解决的问题。目前工程中确定地基承载力最通常的方法是确定地基的极限承载力,取极限承载力除以安全系数,得到地基强度安全的承载力,安全系数 $K=2\sim 3$,然后再复核对应的基础变形,如果变形允许,则强度安全的承载力即为允许的地基承载力,否则,就降低承载力,使变形满足要求。因此理论上要保证强度安全和变形控制的两个承载力的小值,就是地基承载力的允许值。现在存在的困难是,严格的地基极限承载力难以确定,地基沉降变形难以准确计算。由于强度承载力有足够的储备,况且一般工程确定的极限承载力通常有一定的保守性,故即使有一定的误差,安全一般问题不大,但变形计算较难计算准确,通常是按线弹性力学方法计算变形,或按线弹性力学方法计算的应力分布,用压缩试验的 $e-p$ 曲线计算地基的压缩变形,与实际的差异则采用经验系数进行修正,如国家建筑地基规范的经验修正系数为 $1.4\sim 0.2$ ^[1],变化范围较大。变形计算不准,对变形要求的承载力就难定准。因此,理论上,目前地基的极限承载力和变形计算都难以严格准确,尤其是变形难算准。工程实践中只能采用保守的方法来保证工程安全,这样可能会造成工程浪费。因此,地基承载力问题,无论是作为一个科学问题,还是工程问题,都是没有解决好的难题,有必要深入研究,提高地基承载力合理确定的水平,以提高地基基础的设计水平。

1 压板载荷试验确定地基承载力的困难

通常认为现场压板载荷试验确定地基承载力是最可靠的,因为通常由土的室内试验强度指标,按理论公式计算的承载力毕竟是有假设下的理论值,况且其计算所依据的室内试验指标与现场原位土可能还有差异,计算值与实际还是有差异的。压板载荷试验获得的是压板尺寸下的荷载沉降变形曲线,并不是真实基础尺寸下的荷载沉降曲线,由于真实基础的尺寸与压板尺寸不同,应力影响的深度和影响的土层不同,因此,压板载荷试验虽是最接近真实基础的试验,但还不能直接由压板

载荷的试验曲线严格确定实际基础的地基承载力。

那么目前规范怎么解决这个问题的呢?利用压板载荷试验确定地基承载力的方法,以国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)的附录要求为例^[1]。

(1) 极限荷载

当出现下列情况之一时,即可终止加载:

- a) 承压板周围的土明显地侧向挤出;
- b) 沉降 s 急骤增大,荷载-沉降 ($p-s$) 曲线出现陡降段;
- c) 在某一级荷载下,24 h 内沉降速率不能达到稳定标准;
- d) 沉降量与承压板宽度或直径之比大于或等于 0.06。

(2) 地基承载力特征值

a) 当 $p-s$ 曲线上有比例界限时,取该比例界限所对应的荷载值;

b) 当极限荷载值小于对应比例界限的荷载值的两倍时,取极限荷载值的一半;

c) 当不能按上述二款要求确定时,当压板面积为 $0.25\sim 0.5\text{ m}^2$,可取沉降比 $s/b=0.01\sim 0.015$ 所对应的荷载,但其值不应大于最大加载值的一半。

规范的确定方法是综合了理论与经验的成果。

关于极限承载力,这个试验所确定的是对应于压板尺寸的极限承载力,因为按地基极限承载力计算理论,地基的极限承载力由土的强度指标和基础尺寸、埋深等因素所确定,压板试验是无埋深的,因此,压板试验所得的极限承载力不代表真实基础下的地基极限承载力。但尺寸大、埋深大,极限承载力会增大,实际基础尺寸一般大于试验压板尺寸并且有埋深,因此实际基础的地基极限承载力大于压板确定的极限承载力。而地基极限承载力的严格确定其实也还是困难的^[2],计算是理论的结果,是有假设的,即使是压板试验,也不一定能试验到破坏的状态,因此,规范则用沉降比为 0.06 来确定地基的极限承载力^[1]。

关于地基承载力特征值,同样,压板试验所得的承载力特征值还不是真实基础下的特征值,因此,规范给出了依据土性而进行基础宽度和深度修正后才得出实际基础下的承载力特征值,称为修正的承载力特征值,这一修正也是半理论半经验的方法。这样的修正是能保证地基强度安全的,因为特征值保证了安全系数是 2,强度是有安全储备的。但这样确定的特征值不能保证实际基础的变形能

满足要求, 因为实际基础尺寸大, 相同压力下, 基础沉降大于压板沉降, 尺寸效应的沉降关系没有解决, 虽然承载力特征值采用了沉降比的方法确定, 但对应实际基础的沉降必然是大于压板试验的沉降, 如果简单的按半无限线弹性体考虑, 按承载力确定的沉降比值, 基础沉降变形为基础宽度的 $0.01 \sim 0.015$, 如果一个 3 m 宽的基础, 则可能的沉降为 $3 \sim 4.5 \text{ cm}$, 如果基础的沉降以 3 cm 控制, 按沉降比确定的承载力可用的基础宽度应该是 3 m 以内为好, 基础宽度大了, 沉降会变大, 如上海展览馆^[3], 采用箱型天然地基, 承载力满足压板试验的沉降比 0.02 , 但基础宽度 40 m 多, 沉降达 160 cm . 因此, 按沉降比确定的承载力也并不能保证基础的沉降满足要求。

因此, 压板试验确定的特征值保证强度安全, 不确保变形安全。

再者, 试验结果多数是第三款情况, 那么按沉降比确定承载力特征值时, 沉降比为 $0.01 \sim 0.015$, 实际情况中取不同的沉降比会有不同的值, 取哪一个沉降比对应的值呢? 这一个取值也有很大经验的成份, 保守者会取小值, 胆大者会取大值。同时, 广东的建筑地基设计规范则用沉降比为 $0.015 \sim 0.02$ ^[4], 比国家标准大。这样, 使地基承载力特征值更具有多值性, 不同的取法会有不同的值, 难以严格确定。

笔者曾遇到一个实际案例^[5-6], 设计要求地基承载力特征值为 300 kPa , 压板试验最大加载达 900 kPa , 地基未破坏, 试验曲线如图 1 所示。

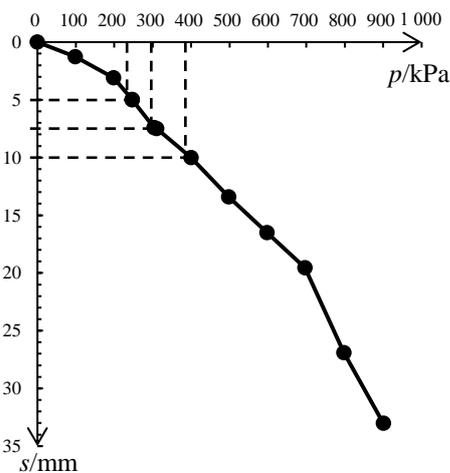


图 1 压板荷载试验曲线
Fig. 1 Plate load test curve

按沉降比确定, $s/b=0.01$ 时, 特征值为 247 kPa , 达不到设计要求, 但若取 $s/b=0.015$, 则特征值为 315 kPa , 达到设计要求, 取哪一个值呢? 如果按广

东规范, 还可以取 $s/b=0.02$ 对应的特征值 400 kPa , 并且也小于最大试验荷载的一半, 都满足以上规范的取值要求。显然, 取不同的沉降比会有不同的承载力特征值。

因此, 由压板试验按沉降比确定的承载力可以保证地基的强度安全, 但并不能保证变形安全, 不知道对应实际基础的沉降, 不能保证实际基础的沉降能满足变形控制的要求。

压板荷载试验虽然是目前被认为是确定地基承载力最可靠的方法, 但还是不能解决合理确定地基的承载力问题。

2 确定地基承载力的 $p-s$ 曲线法

地基允许承载力就是满足地基强度和变形安全所允许的基础底压应力。如果能获得实际基础下的荷载沉降 $p-s$ 曲线, 则地基允许承载力的合理确定可以由强度控制和变形控制的双控制方法确定^[7]。如图 2 所示。

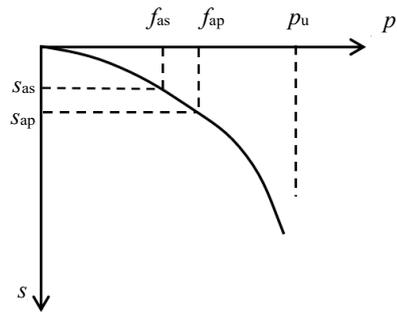


图 2 基础的荷载沉降 $p-s$ 曲线

Fig. 2 $p-s$ curve of load settlement of the actual foundation

由 $p-s$ 曲线可以得到基础对应的地基极限承载力 p_u , 由 $p-s$ 曲线可以得到两个承载力: 其中一个是满足强度要求的承载力:

$$f_{ap} = \frac{p_u}{K} \quad (1)$$

式中: K 为安全系数, 由曲线可以直接得到 f_{ap} 对应的基础沉降 s_{ap} , 同样, 由 $p-s$ 曲线, 可以得到满足沉降 s_{as} 要求时对应的承载力 f_{as} , 则设计可取两者中的小值作为允许的地基承载力。

$$f_a = \min(f_{ap}, f_{as}) \quad (2)$$

这样就保证了地基强度和变形的安全。因此, 由 $p-s$ 曲线, 可以很方便地得到承载力对应的沉降, 以及由沉降得到对应的承载力, 实现变形控制设计, 可以科学合理的确定地基的承载力, 破解地基承载力确定的难题。

一般低压缩地基小尺寸基础,地基承载力可能是强度控制,取值可能是 f_{ap} ,中高压压缩地基,承载力通常是变形控制,取值是 f_{as} 。同一地基场地,由于基础尺寸、埋深不同,其对应的 $p-s$ 曲线都是不同的。

如图3所示为不同基础尺寸的 $p-s$ 曲线,尺寸不同,对应的极限承载力不同,同一荷载 f_a 时,对应的基础沉降不同,小尺寸基础的沉降 s_1 小于大尺寸基础的沉降,大尺寸基础极限承载力大于小尺寸基础承载力。

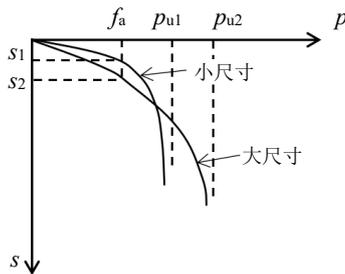


图3 同一地基场地不同尺寸基础 $p-s$ 曲线

Fig. 3 $p-s$ curve of foundation with different sizes in the same foundation site

因此,大尺寸强度控制的承载力会大于小尺寸基础的承载力,而大尺寸的变形控制承载力会小于小尺寸基础的承载力。因此,同一土层对应不同基础的允许地基承载力可能都是不同的。要科学合理的确定地基的承载力,应依据各基础尺寸下的荷载沉降 $p-s$ 曲线,由强度和变形双控确定。这样,要科学地破解地基承载力的确定问题,就需要基础的 $p-s$ 曲线。

3 计算基础荷载沉降 $p-s$ 曲线的切线模量法^[8-9]

目前能合理计算基础 $p-s$ 曲线的方法还是非常有限的。现代土力学虽然发展了有限元数值方法和现代土的本构模型,但由于土的本构模型参数通常是建立于室内土样的试验基础上,而土具有原位性、结构性,存在取样扰动,应力释放等因素,使室内土样有别于现场的原位土,这样,依据室内土样的参数较难反应原位土的特性,尤其是变形参数,室内与现场差异大,这就使得依靠这样的本构模型的数值计算难以较好地计算实际基础的 $p-s$ 曲线。当然最好是对基础进行加载试验,直接测定其 $p-s$ 曲线,但这也并不现实,因为有不同的基础尺寸,且需加的荷载大,而工程中通常做的则是小尺寸的现场压板荷载试验,其与现场基础受力条件最为接

近,压板试验可以获得其完整的 $p-s$ 曲线,如果能由压板试验的 $p-s$ 曲线预测实际基础的 $p-s$ 曲线,则问题即可以解决,关键是要解决尺寸效应和地基土的层状性,切线模量法可以较好地破解这一难题^[10]。

3.1 由压板试验反计算土的强度和变形参数

假设土体的压板试验 $p-s$ 曲线为一双曲线方程^[11]:

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

线性化双曲线方程:

$$a + bs = \frac{s}{p} \quad (4)$$

拟合试验曲线,如图4所示,即可得到 a, b 两个参数。

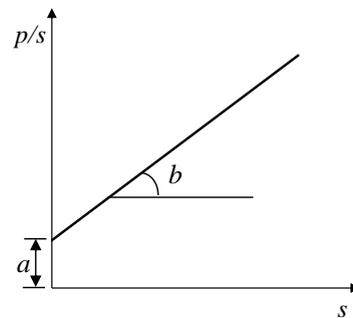


图4 双曲线线性化

Fig. 4 Hyperbolic linearization

该曲线任意点的切线导数为:

$$\frac{dp}{ds} = \frac{(1-bp)^2}{a} \quad (5)$$

由式(3)可知,当 $s \rightarrow \infty$ 时,为压板试验的极限荷载 $p_u=1/b$,由 p_u 可以反计算土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

由式(5),当 $p=0$ 时,压板曲线的初始切线斜率为:

$$k_0 = \frac{dp}{ds} = \frac{1}{a} \quad (6)$$

设土的初始切线模量为 E_0 ,由 Boussinesq 解,则基础的初始线弹性沉降为:

$$s = \frac{Dp(1-\mu^2)}{E_0} \omega \quad (7)$$

基础沉降的初始刚度为:

$$k_0 = \frac{p}{s} = \frac{E_0}{D(1-\mu^2)\omega} \quad (8)$$

则土的初始切线模量可由反算为:

$$E_0 = \frac{D(1-\mu^2)\omega}{a} \quad (9)$$

式中： D 为试验的压板直径； μ 为土的泊松比； ω 为几何系数； E_0 为原位土的初始切线模量。

这样，由压板试验可以得到土的变形和强度的 3 个参数 E_0 、 c 、 φ 。

3.2 土的切线模量^[9]

假设在某一荷载 Δp 下为增量线性，见图 5，则对压板试验引起的沉降增量可按半无限弹性体的 Boussinesq 解为：

$$\Delta s = \frac{D \cdot \Delta p \cdot (1-\mu^2)}{E_t} \cdot \omega \quad (10)$$

E_t 为压板底土体对应荷载 p 处增加一增量荷载 Δp 时的土体等效切线模量，则：

$$E_t = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D(1-\mu^2) \cdot \omega \quad (11)$$

令 $\frac{\Delta p}{\Delta s} = \frac{dp}{ds}$ ，把式 (5) 和前面求得的 a 、 b 代入得压板底处土体对应的切线模量为：

$$E_t = (1 - \frac{p}{p_u})^2 \cdot E_0 \quad (12)$$

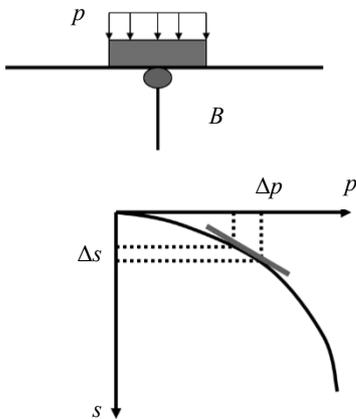


图 5 压板荷载试验曲线
Fig. 5 Plate load test curve

像邓肯模型一样，引入一个破坏比系数 R_f ，则 (12) 式可改写为：

$$E_t = (1 - R_f \cdot \frac{p}{p_u})^2 E_0 \quad (13)$$

式中： p/p_u 一项是压板底面处所受压力 p 与压板底处地基极限荷载 p_u 的比值，反映了土体应力水平对土体切线模量的影响。式 (12) 表明，土的切线模量取决于 p/p_u 比值，而不仅仅取决于 p 值，该项相当于考虑了应力水平对土的切线模量 E_t 的影响。对于不同基础、不同深度，随着深度的增加，基底应力扩散

后附加应力 p 越少，而极限承载力 p_u 越大，则相应的切线模量也就越大，因而随着深度的增加，沉降收敛会越快，从而考虑了土的非线性。这样用这个土的切线模量 E_t 于分层总和法计算基础的沉降，则可以考虑土的非线性变形，从而可以计算基础的荷载沉降非线性全过程。由于 p_u 可以由土的强度指标和基础尺寸、埋深而计算得到，因此，切线模量法其实仅需要土的 3 个力学指标： E_0 、 c 、 φ 。

3.3 基础非线性沉降计算的切线模量法^[10]

如图 6 所示，对土分为若干土层，对第 i 土层，分层厚度为 Δh_i 。

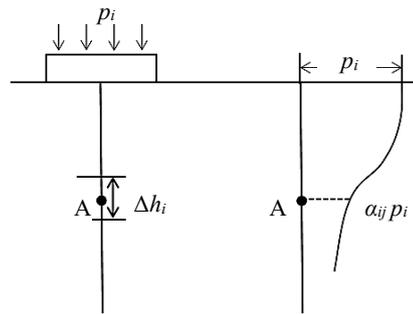


图 6 切线模量的分层求和法

Fig. 6 Layered summation method of tangent modulus

在荷载 p_i 时，增加一个增量荷载 Δp_i 作用下，分层沉降为：

$$\Delta s_{ij} = \frac{\alpha_{ij} \Delta p_i \Delta h_i}{E_{tij}} \quad (14)$$

总沉降增量：

$$\Delta s_i = \sum_{j=1}^n \Delta s_{ij} \quad (15)$$

$$E_{tij} = (1 - \frac{\alpha_{ij} p_i}{p_{uj}})^2 E_0 \quad (16)$$

式中： α_{ij} 为应力分布系数； p_{uj} 是按基础尺寸在分层位置 A 点处的地基极限承载力，可由土的 c 、 φ 、基础尺寸、埋深计算得出。由式 (16) 可见，随着深度增加， α_{ij} 越小，而 p_{uj} 越大， E_t 则也越大，可以反映荷载水平产生的非线性，当在浅层， p_i 接近 p_u 时， E_t 则接近趋于零，沉降无限大，即为破坏，因此，可以计算直到破坏的地基沉降全过程。

3.4 案例

某工程场地为粉质黏土，检测单位在现场对持力层进行了 3 个点的载荷板试验，试验尺寸为方形板，边长 0.5 m，3 个点试验的荷载和沉降关系如图 7 所示，其中 1 个点的试验曲线为图 1 所示。

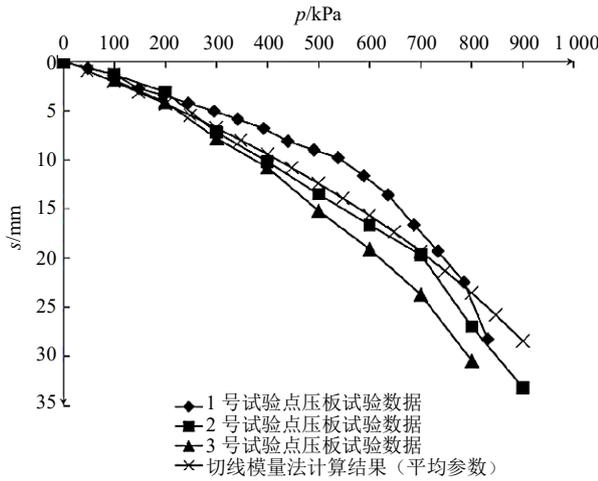


图 7 3 个压板载荷试验曲线
Fig. 7 Load test curves of three plate load tests

按以上方法可以求得 3 个试验点对应的切线模量的参数如表 1 所示。

平均的强度参数为内摩擦角 $\varphi=20^\circ$ ，黏聚力 $c=70$ kPa，与地质报告统计试验提供的代表值内摩擦角 $\varphi=19.2^\circ$ ，黏聚力 $c=73.5$ kPa 是比较接近的。用平均参数按切线模量法计算压板尺寸的荷载沉降曲线，如图 7 所示，与试验曲线接近，说明参数和计算方法可行。

为与压板试验进行比较，假定设计的基础分别为边长 2 m 和 6 m 的方形基础，无埋深的情况来进行分析。

如果用切线模量法，可以计算得到以上两个基础的 $p-s$ 曲线如图 8 所示。

表 1 3 个试验点参数
Table 1 Parameters of three test points

压板试验编号	E_0/MPa	p_w/kPa	假定的 $\varphi/(^\circ)$	反算所得的 c/kPa
1 号试点	30.43	1 505	20	70.20
2 号试点	25.51	1 468	20	68.40
3 号试点	21.10	1 527	20	71.20
平均值	25.68	1 500	20	69.93

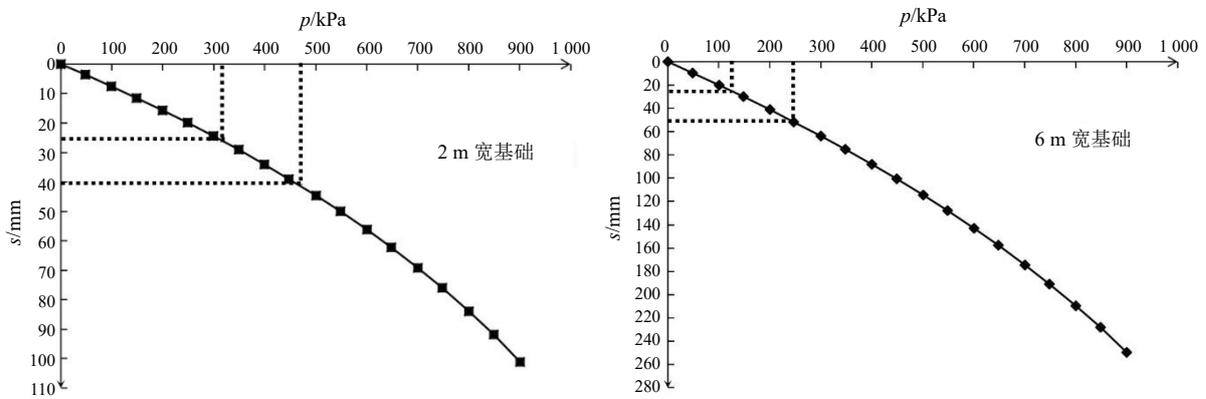


图 8 切线模量法计算所得的基础宽为 2 m 和 6 m 时的 $p-s$ 曲线
Fig. 8 $p-s$ curves when the foundation with 2 m and 6 m in width (calculated by tangent modulus method)

按压板试验最大荷载值对应的强度指标内摩擦角 $\varphi=20^\circ$ ，黏聚力 $c=59$ kPa 计算其对应地基的极限承载力：基础宽 2 m 时为 982 kPa，基础宽 6 m 时为 1 198 kPa。如果按变形控制设计，当控制基础沉降为 25 mm 时，2 m 宽基础由 $p-s$ 曲线可得对应的承载力为 315 kPa，安全系数为 $982/315=3.1$ ，而这个承载力相当于前面用沉降比为 0.015 所确定的承载力，如果按沉降比 0.01 对应的承载力 245 kPa 则显然是保守了。基础如控制沉降为 40 mm，则对于承载力可为 470 kPa，安全系数 $k=2.1$ 。而对应基

础宽 6 m 的基础，沉降控制为 25 mm 则承载力只能 130 kPa，对应地基的安全系数为 $1198/130=9.2$ ，基础如控制沉降 50 mm，则对应承载力为 245 kPa，安全系数 $K=4.8$ ，也即相当于前面图 1 用压板试验的沉降比为 0.01 所对应的地基承载力。因此，压板试验确定的承载力如果用于尺寸较大的基础，沉降是不能保证满足要求的。而取什么样的承载力，应该是依据实际基础的荷载沉降 $p-s$ 曲线，由实际基础的沉降和强度安全系数双控确定。如果用压板试验的 $p-s$ 曲线确定承载力，则既不知道实际基础的

沉降,也不知道安全系数,显然是不能确定合理的承载力。

讨论:切线模量法所需的3个参数 E_0 、 c 、 φ 简单, c 、 φ 通常是由室内试验确定,有丰富的经验值,但也会变异性大,通过压板试验的极限承载力反算,相对较可靠,同时由于允许承载力有足够的安全储备,极限承载力的误差不会影响承载力的安全性。变形控制的承载力取决于变形计算的可靠性,依据现场压板试验反算土的初始切线模量 E_0 较为可靠,同时荷载越接近初始位置,计算越可靠。对于实际允许承载力下通常非线性不是很明显,因此,由 E_0 影响为主的变形计算相对较为可靠。包括双曲线方程的假设,在进入较大的非线性时可能会有误差,而在非线性不大的区域,准确性是比较可靠的。

对于分层土的情况,由于切线模量法对不同土层用不同的3个参数,因而可以考虑基础下有不同土层的影响。

对于大尺寸基础,应力影响深度较大,深部土体处于小应变状态,可以引入小应变的思想,建立高级切线模量计算式^[12]:

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{p}{p_u}\right)^2 \left(\frac{p + c \cot \varphi}{p_0 + c \cot \varphi}\right)^m E_{t0} \quad (17)$$

对于复合地基,较理想的方法也是通过桩和桩间土的变形协调共同作用,求取复合地基的 $p-s$ 曲线^[13],由 $p-s$ 曲线按强度和变形双控的方法确定其承载力是较科学的方法。

4 结 论

(1) 地基承载力的合理确定是土力学的一个基本问题,也是一个百年难题。

(2) 现场压板试验是目前认为确定地基承载力最可靠的方法,但按现行规范方法,用压板试验确定的承载力,可以保证地基的强度安全,但不能保证变形安全,不保证实际基础对应的沉降能满足要求。

(3) 用实际基础的荷载沉降 $p-s$ 曲线,依据强度安全和变形控制双控来确定地基承载力,是破解地基承载力合理确定这个难题的有效途径。

(4) 计算基础荷载沉降 $p-s$ 曲线的有效方法是切线模量法。

(5) 由于实际取用的地基承载力有足够的安全储备,地基极限承载力或非线性的误差不影响安全性,切线模量法确定的 $p-s$ 曲线用于确定承载力有足够的安全性和可靠性。

全储备,地基极限承载力或非线性的误差不影响安全性,切线模量法确定的 $p-s$ 曲线用于确定承载力有足够的安全性和可靠性。

(6) 实际中可以进一步积累经验,不断完善和提高准确性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [2] 杨光华. 地基承载力和变形计算分析[M]//龚晓南, 杨仲轩. 岩土工程计算与分析. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
YANG Guang-hua. Calculation and analysis of foundation bearing capacity and deformation[M]//GONG Xiao-nan, YANG Zhong-xuan. Geotechnical Engineering Calculation and Analysis. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [3] 杨敏. 桩基础设计理论变革: 从强度控制设计到变形控制设计[M]//龚晓南. 岩土工程变形控制设计理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
YANG Min. Reform of pile foundation design theory: From strength control design to deformation control design[M]//GONG Xiao-nan. Deformation Control Design Theory and Practice in Geotechnical Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [4] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑地基基础设计规范: DBJ 15—31—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Guangdong province of housing and urban-rural construction department. Design Code for Building Foundation: DBJ 15—31—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [5] 杨光华. 现代地基设计理论的创新与发展[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 1-18.
YANG Guang-hua. Innovation and development of modern design theory for the foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 1-18.
- [6] 杨光华. 现代土力学理论探索与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
YANG Guang-hua. Exploration and Practice of Modern

- Soil Mechanics Theory[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [7] 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.
- [8] 杨光华. 地基沉降计算的新方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
YANG Guang-hua. The New Method to Calculate the Settlement of the Foundation and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [9] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679-686.
YANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 27(4): 679-686.
- [10] 杨光华. 基础非线性沉降的双曲线模型法[J]. 地基处理, 1997, 8(1): 50-53.
YANG Guang-hua. Hyperbola model in calculating the nonlinear settlement of foundation[J]. Journal of Ground Improvement, 1997, 8(1): 50-53.
- [11] 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.
- [12] 杨光华, 李卓勋, 王东英, 等. 高级切线模量法及其在地基沉降计算中的应用[J/OL]. 岩土工程学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211110.1728.002.html>.
YANG Guang-hua, LI Zhuo-xun, WANG Dong-ying, et al. Advanced tangent modulus method and its application to the foundation settlement calculation[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211110.1728.002.html>.
- [13] 杨光华, 苏卜坤, 乔有梁. 刚性桩复合地基沉降计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2193-2200.
YANG Guang-hua, SU Bu-kun, QIAO You-liang. Method for calculating settlement of rigid-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2193-2200.

关于举办优秀论文评选的通知

为提高《地基处理》期刊的学术水平和论文质量,鼓励和培育优秀作者,本刊自2022年1月开始开展优秀论文评选活动,评选活动每两年一次,对评选出的优秀论文将给予表彰,现将首次优秀论文评选的有关事项通知如下:

一、评选范围

2022—2023年在《地基处理》期刊上刊发的论文。

二、评选程序

参考科学计量指标定量(引用量、下载量等),经专家推选,由《地基处理》编辑委员会评选优秀论文10篇。评选结果在地基处理网站上进行公示,并在2024年第十八届全国地基处理学术讨论会上颁发证书和奖金。

《地基处理》编辑部
2022年1月12日