

复合地基沉降量计算的平均切线模量法

马健

(北京环安工程检测有限责任公司, 北京 100020)

摘要: 地基的沉降量计算一直是地基基础工程中的重点问题, 在地基基础设计过程中地基沉降量是重要的建筑变形控制参数, 在满足地基承载力要求的前提下, 只要将地基的沉降控制在允许变形的范围内, 就能达到更好的经济效益, 因此地基沉降量的准确计算对地基基础工程至关重要。地基沉降量的计算不仅与地基土层的物理力学性质、强度参数、变形指标有关, 还与基础的尺寸有关, 本文在原位载荷试验 $p-s$ 曲线符合双曲线的基本假定条件下, 采用切线模量法反算地基土层的切线模量和强度指标黏聚力, 得到地基土层的变形和强度指标参数后, 再用平均切线模量法计算实际基础的 $p-s$ 曲线, 进而确定实际基础的地基沉降量。文中通过 CFG 桩复合地基原位载荷试验及地基沉降量计算案例对切线模量法计算地基沉降量进行了优化, 并与现行规范中地基沉降量计算方法进行了比较说明, 验证了该计算方法的合理性。

关键词: 沉降量计算; 切线模量; 原位载荷试验; CFG 桩复合地基; 地基承载力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)01-0031-07

Average tangent modulus method for settlement calculation of composite foundation

MA Jian

(Beijing Huan'an Engineering Inspection & Test Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: The calculation of foundation settlement has always been a key issue in foundation engineering. During the process of foundation design, the settlement of foundation serves as a significant parameter for controlling structural deformation. Under the requirements for bearing capacity of foundation, controlling the settlement within the allowable deformation range can lead to improved economic benefits. Therefore, the accurate calculation of foundation settlement is crucial to the foundation engineering. The calculation of foundation settlement not only depends on the physical and mechanical properties, strength parameters and deformation index of the foundation soil, but also depends on the size of the foundation. In this work, assuming that the $p-s$ curve obtained from the in-situ loading test adheres to a hyperbolic shape, the tangent modulus method is employed to calculate the tangent modulus and the strength index cohesion of the foundation soil layer. This enables the determination of deformation and strength parameters for the foundation soil layer. Subsequently, the average tangent modulus method is utilized to calculate the $p-s$ curve for the actual foundation and its settlement. This study optimizes the calculation of foundation settlement using the tangent modulus method by conducting in-situ loading tests on CFG pile composite foundations and comparing the results with the calculation method of current code. This comparison serves to validate the rationality of the proposed calculation approach.

Key words: settlement calculation; tangent modulus; in-situ loading test; CFG pile composite foundation; foundation bearing capacity

0 引言

近年来随着地基处理技术的发展, CFG 桩复合地基在工程应用中取得了较大的进展, CFG 桩通过褥垫层与基础联接, 无论桩落在一般土层还是坚硬

土层上, 均可保证桩间土始终参与工作, 桩、土共同承担荷载, 减少了基础底面的应力集中。CFG 桩复合地基对场地较好的高层建筑是适用的, 它在满足设计要求的同时, 方便了施工、降低了造价、节约了资金和时间, 是一种比较理想的地基处理形

收稿日期: 2023-03-21

作者简介: 马健(1991—), 男, 辽宁沈阳人, 本科, 中级工程师, 主要从事岩土工程相关工作。E-mail: 540016752@qq.com.

<https://www.academax.com/doi/10.3785/j.issn.2096-7195.2024.01.005>

式。工程实践表明,CFG桩复合地基对减小地基上建筑物的沉降和不均匀沉降有着明显的效果。不同的建(构)筑物对沉降变形有着不同的要求,在满足地基承载力要求的前提下,只要将CFG桩复合地基的沉降控制在允许变形的范围内,就能达到经济效益的最优和各种设计参数的合理组合。

目前CFG桩复合地基工程中确定地基承载力最可靠的方法是通过原位载荷试验^[1]确定地基承载力的极限值,再除以两倍的安全系数得到满足地基承载力要求的地基承载力特征值,同时根据变形控制要求确定对应的地基承载力特征值,取两者较小值,就是最终确定的地基承载力特征值。由于地基承载力往往有足够的安全储备,其承载力安全性一般问题不大,但地基沉降变形难以准确计算。因此CFG桩复合地基的设计以控制变形为主要目标,地基的沉降计算应是当前需迫切解决的问题。

目前地基的沉降计算常用的方法是采用基于半无限线弹性体一维压缩变形假定条件下的分层总和法,其最大的难点在于计算参数的取用,即侧限压缩模量或变形模量的确定。国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[2]采用的是室内试验确定的侧限压缩模量来计算地基的压缩变形,计算沉降与实际基础沉降的沉降差异则通过经验系数进行修正,国标《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[2]经验系数为0.2~1.4,行标《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[3]经验系数为0.2~1.0。本文提出的平均切线模量法源于原状土切线模量法^[4],该方法在原位载荷试验 $p-s$ 曲线符合双曲线的基本假定条件下,采用切线模量法反算地基土层的切线模量 E 和抗剪强度指标黏聚力 c ,得到地基土层的变形和强度指标参数后,再用切线模量法计算实际基础的 $p-s$ 曲线,进而确定实际基础的地基沉降量。由于该方法的切线变形模量源于原位载荷试验 $p-s$ 曲线,因而能更好地反映地基的变形特征。本文通过在计算过程中对平均切线变形模量法进行优化改进,使得该方法进行地基沉降计算更加简便可行。

1 沉降量计算方法的讨论

1.1 规范法

国标《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[2]采用室内试验确定的侧限压缩模量利用半无限线弹性体一维压缩变形理论分层总和法计算地

基沉降量,再通过沉降经验系数对结果进行修正,以得到最终沉降量。该方法在工程中被普遍使用并积累了大量经验,但该方法仍具有一定的局限性。

(1) 侧限压缩模量准确确定的局限性

目前一般的地基沉降计算主要依靠室内试验 $e-p$ 曲线确定土试样的侧限压缩模量,但室内试验的参数一方面受取样扰动的影响,与实际原状土有较大的差异;另一方面地基土的压缩变形不仅与地基土的物理力学性质、变形指标有关,还与压缩试验承载板的尺寸有关。由于地基土压缩变形的尺寸效应,使得室内试验土试样的压缩模量远小于原位载荷试验反算的压缩模量。基于以上原因使得侧限压缩模量难以准确确定,只能采用经验系数对沉降量最终计算结果进行修正。

(2) 沉降计算理论模型的局限性

现行规范在地基基础设计过程中地基承载力与沉降计算是分离的,地基承载力采用极限平衡理论通过抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 进行计算,沉降量计算采用线弹性理论通过压缩模量或变形模量进行计算,但地基其实是一个整体,由于缺乏有效的解决办法,把一个问题分解为两个近似问题来解决,这就导致了工程应用中地基承载力安全储备过高而地基沉降难以准确控制的问题。

1.2 原状土切线模量法

除规范法以外,如何取得原状土力学参数并把原状土的变形指标用于沉降计算还没有得到很好的解决。工程中直接可靠的方法是采用原位载荷试验来确定地基的承载力及原位变形模量,但实际上地基的承载力及地基沉降变形不仅与地基土的物理力学性质、强度参数、变形指标有关,还与基础的尺寸有关。原位载荷试验通常是进行小尺寸无埋深的试验,不可能用实际基础尺寸来进行试验,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及变形模量的问题,这个问题理论上没有得到很好的解决。

原状土切线模量法假定原位载荷试验 $p-s$ 曲线符合一双曲线方程^[4-5],即:

$$p = \frac{s}{a + bs} \quad (1)$$

通过原位载荷试验 $p-s$ 曲线的拟合可以得到 a 和 b ;再通过计算推导得到计算公式^[6],即:

$$p_u = \frac{1}{b} \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{D(1-u^2)\omega}{a} \quad (3)$$

$$E_t = (1 - \frac{p}{p_u})^2 E_0 \quad (4)$$

$$p_u = cN_c + \mu_0 dN_d + \frac{1}{2} \mu b N_b \quad (5)$$

式中： D 为试验的压板直径； μ 为土的泊松比； ω 为刚性承载板的形状系数； E_0 为原状土的初始切线模量； E_t 为承压板下土体对应某一荷载 p 处增加一增量荷载时的土体等效平均切线变形模量； p_u 为根据《工程地质手册》^[7] 中地基极限承载力公式计算确定的地基极限承载力。

杨光华等^[8] 认为 p/p_u 是压板底面处所受压力 p 与极限荷载 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 (4) 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，因此随着埋深越大，对应该点的 p_u 越大，则由式 (4) 可知对应的 E_t 越大，可以由此计算实际基础尺寸下不同深度处地基土的变形模量，进而采用分层总和法计算地基最终沉降量。因此，考虑应力水平影响确定切线模量 E_t 更符合实际。

笔者认为 E_t 的含义是代表承压板下土体对应某一荷载 p 处增加一增量荷载时的基底压力影响深度范围内总土体的等效平均切线变形模量，而非代表选取某一计算厚度土层的切线变形模量。例如假设地基计算深度为 10 m，分 10 层计算，利用上述方法计算第一层的切线变形模量时采用 1 m 深度应力扩散后对应的附加应力 p_1 和 1 m 埋深处对应地基极限承载力 p_{u1} ，认为计算得到了第一层土层的切线变形模量 E_{t1} ，而该 E_{t1} 实际代表的应该是 1 m 以下 9 m 范围内总土体的等效平均切线变形模量。并且初始切线变形模量 E_0 也是原位载荷试验 $p-s$ 曲线上荷载 p 无限接近 0 时，增加一增量荷载的基底压力影响深度范围内总土体的等效平均切线变形模量，所以 E_t 的意义也在于此。上述算法实际上对承载板或实际基础下地基土的变形模量进行了重复叠加使用，沉降计算结果应是偏大的。

实际上，地基深部土体的变形模量理应是埋深越大变形模量越大的^[9]，这是毋庸置疑的，只是上述公式计算的值所代表的含义并不是某一深度土体单元的变形指标，而是计算深度范围内土体总体的一种等效的指标，其内里已包含了变形模量随深度的变化。

因此本文中反算的 E_{t1} 代表的是承压板下土体对应某一荷载 p 处增加一增量荷载时的基底压力影响深度范围内总土体的等效平均切线变形模量，用

这种取值来进行实际基础的沉降变形计算，即平均切线变形模量法。

2 平均切线模量法

某 CFG 桩复合地基工程进行原位载荷试验，地基承载力特征值为 450 kPa，最大加载值为 900 kPa，承载板尺寸为 1.5 m×1.5 m，加载分级为 10 级，每级荷载 90 kPa，原位载荷试验的试验曲线及验证曲线见图 1。

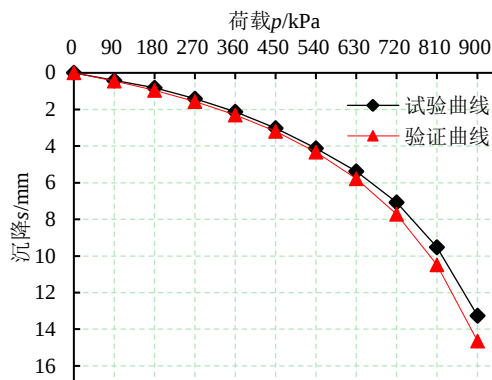


图 1 原位载荷试验的试验曲线及验证曲线

Fig. 1 Test curve and verification curve of in-situ loading test

根据原位载荷试验的 $p-s$ 曲线计算确定 E_0 、 p_u 值，再由式 (4) 可反算得到不同荷载水平承载板下地基土总体的平均切线变形模量，以其代替传统分层总和法的压缩模量，采用分层总和法计算载荷试验下的 $p-s$ 曲线，与实测的 $p-s$ 曲线进行比较，从而检验本方法的可行性。具体过程如下：

如图 2 所示，可得 $a=0.004\ 146$ ， $b=0.000\ 803$ ，土的泊松比 μ 按 0.25 考虑，正方形刚性承载板的形状系数 $\omega=0.886$ ，假定地基土内摩擦角 $\varphi=25^\circ$ ，则 $N_c=20.72$ ， $N_d=10.66$ ， $N_b=10.88$ ， $d=0\text{ m}$ ， $b=1.5\text{ m}$ ，试验场地地下水位较浅，故 $\gamma_0=\gamma=10\text{ kN/m}^3$ 。

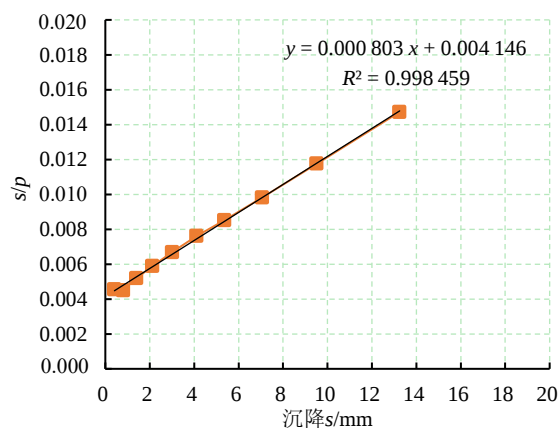


图 2 原位载荷试验的拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of in-situ loading test

按式（2）～（3）可得 $E_0=300.52\text{ MPa}$, $P_u=1\ 245.33\text{ kPa}$, 按式（5）反算可得 $c=56.16\text{ kPa}$, 按式（4）依次求得不同荷载水平下的平均切线变形模量 E_t , 计算过程中采用每一荷载段中值荷载所对应的切线变形模量代表该段荷载的平均切线变形模量, 如图 3 所示, 荷载越大, 切线变形模量的变化率越小, 因此荷载段中值对应的切线变形模量比荷载段两端荷载对应的切线变形模量的平均值更保守, 即 0~90 kPa 荷载段计算沉降时采用 45 kPa 荷载水平对应的切线变形模量, 即:

荷载增量段 0~90 kPa 采用 $p=45.00\text{ kPa}$ 计算得:

$$E_{t1}=(1-45.00/1\ 245.33)^2\times300.52=279.19\text{ MPa};$$

荷载增量段 90~180 kPa 采用 $p=135.00\text{ kPa}$ 计算得:

$$E_{t2}=(1-135.00/1\ 245.33)^2\times300.52=238.89\text{ MPa};$$

其他同理计算。

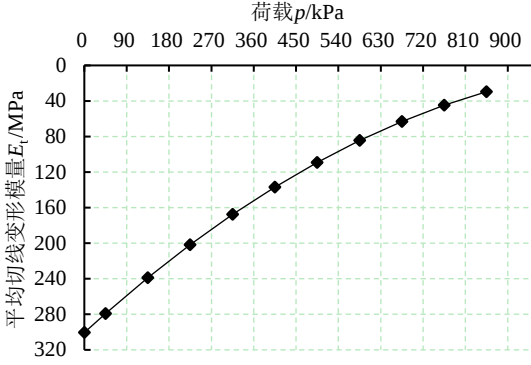


图 3 原位荷载试验的切线模量曲线
Fig. 3 Tangent modulus of in-situ loading test

根据分层总和法^[10], 式（6）计算各荷载水平下增量荷载 $\Delta p=90\text{ kPa}$ 时的分级沉降量, 沉降计算深度取 30 m, 详细计算结果如表 1 所示。

$$\Delta s=\beta\frac{\Delta p H}{E_t}\tag{6}$$

式中: $\beta=1-\frac{2\mu^2}{1-\mu}$ 。

表 1 沉降量计算表

Table 1 Settlement calculation

荷载增量段/kPa	中值荷载/kPa	平均切线模量 E_t /MPa	荷载 p /kPa	分级 Δs /mm	累计 s /mm
0~90	45.00	279.19	90	0.44	0.44
90~180	135.00	238.89	180	0.51	0.95
180~270	225.00	201.73	270	0.61	1.56
270~360	315.00	167.72	360	0.73	2.30
360~450	405.00	136.84	450	0.90	3.19
450~540	495.00	109.09	540	1.13	4.32
540~630	585.00	84.49	630	1.45	5.77
630~720	675.00	63.03	720	1.95	7.72
720~810	765.00	44.71	810	2.75	10.47
810~900	855.00	29.52	900	4.16	14.64

通过以上计算得到验证曲线, 如图 1 所示, 验证曲线与原位荷载试验曲线基本一致, 说明通过平均切线模量法计算得到荷载曲线是可行的; 计算值略大于实测值说明平均切线模量法是偏于安全的。

3 案例应用

现在利用上述工程的原位荷载试验 $p-s$ 曲线和平均切线模量法来计算实际基础尺寸下的荷载 $p-s$ 曲线。该工程为 1 栋塔楼, 地上 25 层, 地下 2 层, 采用箱型基础, 基础埋深 5.85 m, 地下水位于地表以下 1.4 m, 基础尺寸为 30 m×30 m, 基底压力为

450 kPa, 沉降量允许值为 60 mm。CFG 桩复合地基采用正方形布桩, 桩间距 1.5 m×1.5 m, 桩长 18 m。原位荷载试验 $p-s$ 曲线即上述曲线（图 1）, 地基土层物理力学指标统计表如表 2 所示。

由上述原位荷载试验 $p-s$ 曲线反算得 $c=56.16\text{ kPa}$, 地基土内摩擦角 $\varphi=25^\circ$, 则 $N_c=20.72$, $N_q=10.66$, $N_\gamma=10.88$, $d=5.85\text{ m}$, $b=30\text{ m}$, 地下水位较浅, 故 $\gamma_0=\gamma=10\text{ kN/m}^3$ 。按式（5）计算得 $P_u=3\ 419.34\text{ kPa}$, 初始切线模量仍为 $E_0=300.52\text{ MPa}$ 。

按上述过程计算得到实际基础沉降量计算如表 3 所示及实际基础的计算荷载曲线如图 4 所示, 沉降计算深度取 30 m, 满足计算要求。

表 2 地基土层物理力学指标统计表

Table 2 Physical and mechanical indexes of foundation soil layer									
土层名称	层厚/m	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	承载力 f_{ak}/kPa	压缩模量 E_s/MPa	含水量 $w/\%$	孔隙比 e	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	标准贯入 $N_{63.5}$
素填土	1.00	18.5	80	5.00	19.1	0.68	8.2	0.15	12
粉质黏土	2.00	19.0	120	7.00	23.6	0.71	12.5	0.42	—
粉质黏土	2.85	19.0	120	8.00	24.8	0.78	13.2	0.36	—
黏质粉土	2.00	19.0	150	14.41	19.6	0.67	8.0	0.03	—
细中砂	4.00	20.0	210	32.00	—	—	—	—	28
粉质黏土	2.00	19.0	210	15.57	28.0	0.78	14.0	0.49	—
细中砂	0.70	20.0	220	35.00	—	—	—	—	33
粉质黏土	7.00	19.0	210	16.53	22.9	0.77	13.6	0.54	—
细中砂	0.70	20.0	220	35.50	—	—	—	—	42
粉质黏土	5.50	19.0	230	15.78	24.1	0.70	12.7	0.32	—
细中砂	3.00	20.0	240	26.82	—	—	—	—	56
细中砂	3.00	20.0	240	26.82	—	—	—	—	—
中粗砂	2.10	20.0	230	44.70	—	—	—	—	78

表 3 实际基础沉降量计算表

Table 3 Calculation of foundation settlement					
荷载增量段/kPa	中值荷载/kPa	平均切线模量 E_t/MPa	荷载 p/kPa	分级 $\Delta s/\text{mm}$	累计 s/mm
0~90	45.00	292.66	90	4.76	4.76
90~180	135.00	277.25	180	5.02	9.78
180~270	225.00	262.27	270	5.31	15.09
270~360	315.00	247.70	360	5.62	20.72
360~450	405.00	233.54	450	5.96	26.68
450~540	495.00	219.81	540	6.34	33.02
540~630	585.00	206.48	630	6.75	39.76
630~720	675.00	193.58	720	7.20	46.96
720~810	765.00	181.09	810	7.69	54.65
810~900	855.00	169.02	900	8.24	62.89

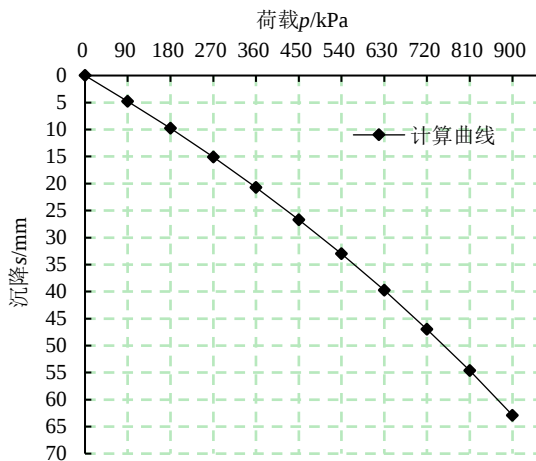


图 4 实际基础的计算载荷曲线
Fig. 4 Calculated curve of p - s results

规范法计算实际基础沉降量见表 4，经计算复合地基承载力特征值 f_{spk} 为 400 kPa，修正后复合地基承载力特征值 f_{spa} 为 464.9 kPa，满足地基承载力设计要求，沉降计算深度取 30 m，满足计算要求。

经计算压缩模量的当量值为 38.889 MPa，沉降计算经验系数取 0.200，总沉降量为 36.45 mm。

基底压力按 450 kPa 考虑时，平均切线模量法计算沉降结果与规范法计算沉降结果、竣工时沉降监测结果对比情况见表 5。

结果表明，用平均切线模量法计算的沉降量与实际沉降量较接近，而规范法计算结果偏大，虽然都符合地基允许沉降量 60 mm 的要求，但平均切线模量法较符合实际。

表 4 实际基础沉降量计算表（规范法）
Table 4 Calculation of foundation settlement (specification method)

土层名称	基底以下 深度 z/m	应力系数积分 $z_i\bar{\alpha}_i-z_{i-1}\bar{\alpha}_{i-1}$	天然地基 E_s/MPa	复合地基 E_s/MPa	分级 $\Delta s/\text{mm}$	累计 s/mm
黏质粉土	2.00	1.999 1	14.41	38.46	19.72	19.72
细中砂	6.00	3.937 6	32.00	85.41	17.49	37.21
粉质黏土	8.00	1.880 7	15.57	41.56	17.17	54.38
细中砂	8.70	0.636 3	35.00	93.42	2.58	56.96
粉质黏土	15.70	5.542 9	16.53	44.12	47.66	104.62
细中砂	16.40	0.466 9	35.50	94.76	1.87	106.49
粉质黏土	18.00	1.009 4	15.78	42.12	9.09	115.58
粉质黏土	21.90	2.149 2	15.78	15.78	51.67	167.25
细中砂	24.15	1.061 7	26.82	26.82	15.02	182.27

表 5 计算沉降与实测沉降结果对比
Table 5 Comparison between calculated settlement and
measured settlement mm

平均切线模量法	规范法	实测沉降
26.68	36.45	26.00

4 结 论

（1）现行规范中地基沉降量计算方法主要依靠室内试验确定的压缩模量，但室内试验的参数与实际原状土有较大的差异，且地基沉降量的计算不仅与地基土的物理力学性质、强度参数、变形指标有关，还与基础的尺寸有关，因此本文采用原位载荷试验曲线反算得到地基土变形参数，进而求得实际基础尺寸的地基沉降量，具有较好的科学合理性。

（2）平均切线模量法在变形模量的选取上采用某一荷载段中值对应的切线模量代表增量荷载下地基土沉降计算深度范围内土体总体的等效平均切线变形模量，使计算过程简化，易于理解，并且计算结果与实测结果具有较好的一致性。

（3）文中根据原位载荷试验反算实际基础地基沉降过程中有着诸多假定前提条件，合理确定计算参数是地基沉降计算的关键。在 CFG 桩复合地基工程中，由于桩土共同承担荷载、共同发挥作用，其更接近于一个均质的线弹性体地基，因而在变形参数上具有较好的均一性，采用平均切线变形模量参数进行计算更具代表性。在工程实践中需要进一

步积累经验，不断完善，以更好地用于解决地基沉降计算问题。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Soils: JGJ 340 — 2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007 — 2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code

- for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [4] 杨光华. 残积土上基础非线性沉降的双曲线模型的研究[C]//第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 辽宁大连, 2001: 168-171.
- YANG Guang-hua. A study on hyperbolic model for estimating nonlinear settlement of foundation on residual soil[C]//Proceeding of the Seventh National Conference on Numerical Analytical Methods in Geomechanics. Dalian, Liaoning, 2001: 168-171.
- [5] 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. The hyperbolic model for estimating nonlinear settlement of foundation[J]. Ground Improvement, 1997, 8(1): 50-53.
- [6] 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.
- [7] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第五版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 455-458.
- Editorial Board of Geological Engineering Handbook. Geological Engineering Handbook[M]. Fifth Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 455-458.
- [8] 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.
- [9] 杨光华. 确定地基承载力的 $p-s$ 曲线法[J]. 地基处理, 2022, 4(2): 91-98.
- YANG Guang-hua. Determining foundation bearing capacity of $p-s$ curve method[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(2): 91-98.
- [10] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 127-129.
- CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 127-129.