

真空预压法沉降计算经验系数取值方法的研究

何小飞

(江苏科能岩土工程有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 采用真空预压法处理软土地基时, 目前还缺少资料计算最终沉降值的经验系数。国家规范 GB 50007-2011 的公式和行业标准 JTS 147-2-2009 的公式都可用来计算沉降值。它们的公式不同, 但原理相同, 所以结果也应该相同, 借此可获得经验系数取值的方法。用国家规范 GB 50007-2011 的公式计算时, 土的压缩模量应取用实际压力对应的值。用行业标准 JTS 147-2-2009 的公式计算时, 应考虑真空压力的衰减。选择各自合适的经验系数, 使两种计算方法所得的沉降曲线重叠, 即可得到各自的沉降经验系数。通过某变电站的实例, 推演获取经验系数的方法, 其结果用实测资料验证, 取得满意的效果。

关键词: 真空预压; 分层总和法; 经验系数; 最终沉降值; 压力衰减

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 2096 - 7195(2019)03 - 0033 - 06

作者简介: 何小飞 (1982 -), 男, 江苏省新沂市人, 工程师, 主要从事地基处理、岩土工程监测与检测工作。
E-mail: hexiaofei@qq.jspdi.com.cn。

Method of empirical coefficient of settlement calculation with vacuum preloading method

HE Xiao-fei

(Jiangsu Keneng geotechnical engineering co., Ltd. Nanjing 211102, China)

Abstract: There is no information on calculating the empirical coefficient of final settlement value when the soft soil foundation is treated by the vacuum pre-loading method. The formula of national standard GB 50007-2011 and the formula of industry standard JTS 147-2-2009 can be used to calculate the settlement value. They have different formulas, but the same principles and the same results. Therefore, the empirical coefficient can be obtained. The compressive modulus of the soil should be taken from the value corresponding to the actual pressure when calculating with the formula of the national standard GB 50007-2011. The attenuation of the vacuum pressure should be considered when calculating by the formula of the industry standard JTS 147-2-2009. By selecting the appropriate empirical coefficients, the settlement curves obtained by the two calculation methods are overlapped, and the respective settlement experience coefficients can be obtained. Through the example of a substation, the method of obtaining the empirical coefficient is derived, and the results are verified by the measured data, which can give the satisfactory results.

Keywords: vacuum preloading; layer-wise summation method; empirical coefficient; final settlement value; pressure attenuation

0 引言

真空预压法的设计, 在真空压力作用下的沉降计算是必须进行的。国家规范 GB 50007-2011《建筑地基基础设计规范》和行业标准 JTS 147-2-2009《真空预压加固软土地基技术规程》中的公式, 都可以用来计算最终沉降量。上述两种标准分别提出了不同的沉降计算经验系数。文献^[1]又提醒大家应注意真空预压和堆载预压不同, 由于真空预压周围土产生指向预压区的侧向变形, 因此按单向压缩分层总和法计算所得的固结沉降应乘以一个小于 1 的

经验系数方可得到实际的沉降值。有作者根据多年的工程实测资料, 提出了仅适用于个别地区的固结沉降经验系数的建议值^[2]。对于其它地区, 还无法直接应用。经验系数如何取值是需要解决的问题。国家规范 GB 50007-2011 的公式和行业标准 JTS 147-2-2009 的公式, 虽然它们的形式不同, 但原理相同, 其结果也应该相同, 借此可获得比较合适的经验系数。计算表明: 用 GB 50007 公式计算沉降

时直接采用岩土工程勘察报告的压缩模量 $E_{s,1-2}$ 、 $E_{s,1-3}$ 等, 计算所得的沉降偏小; 用行业标准 JTS 147 计算沉降时, 不考虑真空压力的衰减, 计算所得的沉降值偏大。若采取以下措施, 可以解决经验系数取值的难题。基本步骤如下: 第一步, 用上述两种标准的沉降计算公式分别算出沉降经验系数为 1.0 的最终沉降值。用 GB 50007 公式计算时, 压缩模量采用岩土勘察报告中压缩试验 $e-p$ 曲线上的实际压力段的压缩模量; 用 JTS 147 计算沉降时, 真空压力应考虑随深度的衰减, 当缺乏实测的衰减资料时, 可通过试算, 从低到高选择合适的衰减值。第二步, 绘制两种计算的各层位处累计沉降量 Σs_i 与深度 z 的关系曲线。第三步, 反复设定各自的沉降经验系数, 使两条曲线靠拢, 当两条曲线基本重叠时, 即为需要的沉降经验系数。笔者利用某变电站的实例, 演算了解决此难题的过程。用此例实测的地面沉降等资料验证, 获得较满意的结果。现将具体步骤介绍于后, 供读者参考。

1 工程概况

1.1 场地条件

拟建的某变电站位于黄海之滨, 原为盐池, 现已废弃。站址地貌单元为海积平原, 属典型的滨海深厚软土区。经方案比较, 采用真空预压法处理。

变电站总平面是矩形面积外加一小块, 呈刀把形。预压平面尺寸如图 1 所示, 面积为 20160 m², 略大于变电站的面积。

为满足抗洪需要, 场地需填高 1.5 m。经真空预压后场地会产生约 1.0 m 的下沉, 共需填土 2.5 m, 折合填方荷载约为 45 kPa。根据经验, 膜内能达到 80 kPa 的真空压力, 已大于填土荷载, 足以将填土

荷载产生的大部分沉降在预压过程中完成, 大大减小了工后沉降。

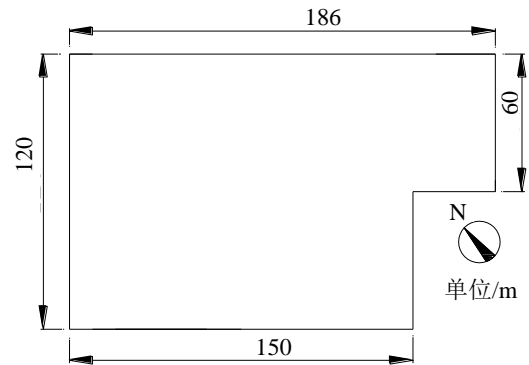


图 1 真空预压加固范围图

Figure 1 Vacuum preloading reinforcement range

1.2 岩土条件

站址地区地形平坦, 地势较低, 地面高程一般为 2.09~3.38 m。地层主要由第四系全新统海积成因的黏土、淤泥、粉质黏土、粉质黏土夹粉土和粉砂等组成。各土层的主要物理力学参数见表 1。

1.3 排水系统及密封措施

竖向排水井采用 FDPS-B 型防淤堵塑料排水板, 按正方形布置, 间距 0.8 m, 深度 20 m。真空主管采用 $\Phi 50$ mm 的 PVC 钢丝软管, 支管采用 $\Phi 25$ mm 的 PVC 钢丝软管, 增压管由弹簧支撑, 正方形布置, 间距 2.4 m, 管径 $\Phi 32$ mm, 深度为 5 m, 透气段 3 m, 密封段 2 m。用手型接头将排水板与真空支管相连, 真空支管与真空主管相连, 真空主管再连接到不倒翁集水井。密封膜采用 0.12 mm 厚的聚氯乙烯膜 2 层。膜下采用 200 g/m² 短丝无纺土工布 1 层。四周密封沟, 深 1 m, 底宽 1 m。用功率为 55 kW 机械式真空泵抽真空。

表 1 土层主要物理力学性质指标

Table 1 Main physical and mechanical properties of soil layers

层序	名称	重力 密度 /(kN/m ³)	孔隙比 e	压缩 系数 /MPa ⁻¹	压缩 模量 /MPa	渗透系数		地基 承载力 /kPa
						竖向 /($\times 10^{-7}$ cm/s)	水平	
①	黏土	17.6	1.142	0.79	2.8	0.829	1.27	60
②	淤泥	16.0	1.719	1.84	1.5	1.29	2.15	50
③	粉质黏土夹粉土	19.3	0.770	0.32	5.7	44.2	124.0	120
④	粉质黏土	19.5	0.650	0.24	6.8	0.965	2.15	150
⑤	粉土夹粉质黏土	19.2	0.692	0.13	12.9	100	200	180
⑥	粉质黏土	18.6	0.941	0.39	5	1.1	2.3	120
⑦	粉质黏土夹粉土	19.5	0.686	0.21	8.8	45	130	170
⑧	粉砂	19.5	0.645	0.11	10.9	2000	2200	180
⑨	粉质黏土	18.4	0.965	0.40	4.8	1.2	2.2	120

1.4 监测项目

本工程主要监测项目有地表沉降、真空度、分层沉降、孔隙水压力、土体水平位移和地下水位等 6 项。其中地表沉降 36 个点, 分层沉降 6 孔。

2 最终沉降

2.1 实测沉降曲线推算

(1) 双曲线函数法

根据实测沉降曲线推算地基的最终沉降量有多种方法^[3], 目前常用的有经验双曲线法和三点法。行业标准 JTS 147-2-2009 推荐的是经验双曲线法, 它是将满载后的所有观测结果都参与统计分析, 剔除异常点后求得 α 、 β , 从而求得最终沉降量 s_c ^[4]。

$$s_t = s_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

$$s_c = s_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

式中: s_t 为满载 t 时间的实测沉降量 (cm); s_0 为满载开始时的实测沉降量 (cm); t 为满载预压时间 (s), 从满载时刻算起; s_c 为最终沉降量 (cm); α 、 β 为计算参数, 可根据实测资料确定。 α 是图 2 中直线在纵坐标上的截距, β 是图 2 中直线的斜率。

以时沉比 $T_s = t/(s_t - s_0)$ 为纵坐标, 以 t 为横坐标, 建立坐标系。以 36 个地面沉降标各时刻实测沉降值平均值 s_t 算得 T_s , 绘制时沉比 T_s 与预压时间 t 的关系曲线图如图 2 所示。

图中双曲线函数拟合曲线是条直线, 求得该直线的斜率 β 就可按式 (2) 算得最终沉降量 s_c 。已知 $s_0 = 0$, 用最小二乘法算得 $\alpha = 2.2383$, $\beta = 0.006786$, 代入式 (2) 可得 $s_c = 1473.6$ mm。相关系数 $r = 0.994$ 。方差分析检验结果 $F = 3113$ 远大于 $F_{1,38}^{0.01} = 7.36$, 为高度显著^[5]。

(2) 三点法

根据恒载期间实测沉降与时间的关系曲线特征, 利用浙江大学曾国熙教授提出的三点法推求地基的最终沉降值, 选取等时距的三点 t_1 、 t_2 、 t_3 , 对应的沉降值为 s_1 、 s_2 、 s_3 , 最终沉降值计算公式为:

$$s_c = \frac{s_2^2 - s_1 \times s_2}{2s_2 - s_1 - s_2} \quad (3)$$

本例等时距的三点取沉降曲线的末端第 96 d、112 d 和 128 d。预压区内共 36 个测点, 算得最终沉降量的平均值为 $s_{\mu} = 1167.1$ mm, 标准差 $\sigma = 146.3$ mm。36 个测点中只有 B24 的 $T_0 = 5.116$ 大于舍弃值的临界值 $T = 2.82$, 经舍弃 B24 的数据后, 算得 35 个测点最终沉降量的平均值为 $s_{\mu} = 1188.5$ mm,

标准差 $\sigma = 75.2$ mm。35 个测点的 T_0 值均小于舍弃值的临界值 T 。最终沉降值 $s_c = 1188.5$ mm。

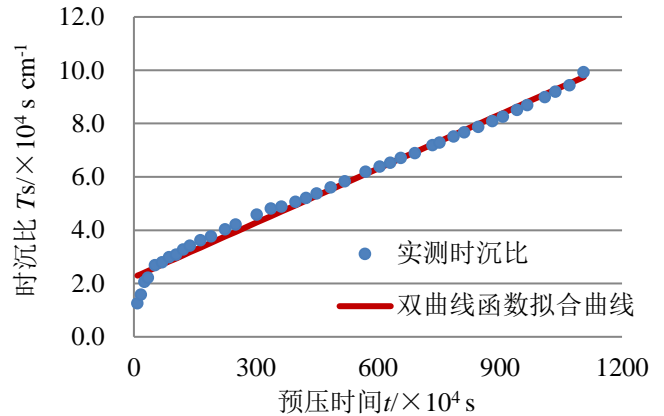


图 2 时沉比 T_s 与预压时间 t 的关系曲线图

Figure 2 Relation curve between time settlement ratio and preloading time

2.2 理论计算

计算以《岩土工程勘测报告》中 IS16 钻孔为例。

(1) GB 法

按照国家规范 GB 50007-2011 中的分层总和法计算最终沉降值。计算荷载为 80 kPa。压缩层深度计算值取附加应力与自重应力比等于 0.1 的深度^[4], 为 66.3 m。

总沉降量计算公式为^[6]:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \quad (4)$$

表 2 列出的是用 GB 法算得的 $p_0 = 80$ kPa 作用下, 各层土的分层沉降量及各深度处的 s' 值。

(2) JTS 法

按照 JTS 147-2-2009 《真空预压加固软土地基技术规程》, 进行最终竖向沉降量计算。压缩层深度与 GB 法相同。

总沉降量计算公式为^[4]:

$$s_c = m_s s' = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (5)$$

式中符号意义见参考文献^[4]。 e_{0i} 和 e_{1i} 均取自《岩土工程勘测报告》中的各土层拟合 $e-p$ 曲线, 自重压力取各层中点值, 各层 e_{1i} 值与真空压力有关, 不考虑真空度往下传递的衰减因素时的各层土的分层沉降量及各深度处的 $\sum s_i$ 值也列于表 2。

2.3 各种计算方法的比较

(1) 两种实测值推算结果的比较

三点法的最终沉降值偏小,与双曲线法的结果差 285.1 mm,与 36 个地面沉降标实测值的平均值 1142 mm 仅差 46.5 mm。由此算得的固结度可达 0.96,这是不可能的。可见三点法的推算结果不宜采用。

(2) 两种理论计算结果的比较

两种理论方法计算结果相差较大。从图 3 中可见两条曲线虽然线型相似,但随深度的增加,两曲线的分离越来越远,到压缩层底时,相差达 362.5 mm。实际上,式(4)与式(5)是同一个压缩理论推导而来的,通过参数替代可以互相换算。所以计算结果应该基本相等才对。从计算过程分析,其原因是:式(4)中的 E_{si} 采用表 1 中的 E_s ,而不

是各层土实际所受的 p_1 、 p_2 对应的压缩模量值,岩土勘察报告中的 $E_{s,1-2}$ 和 $E_{s,1-3}$ 一般大于实际所受的 p_1 、 p_2 对应的压缩模量值,所以计算的沉降值偏小。

(3) 双曲线法与理论计算的比较

虽然 GB 法的计算值与双曲线法的最终沉降值 s_c 非常接近,但是乘以小于 1.0 的经验系数后就会产生较大的差值。

将表 2 中的深度 z 和累计沉降 Σs_i 绘制的曲线如图 3 所示。

JTS 法用式(5)计算,其中各层 e_{li} 值与真空压力有关,当不考虑真空度衰减因素时计算结果 s' 值必然偏大。何况 JTS 147-2-2009 的经验系数 $m_s=1\sim 3$, $m_s s'$ 值会更大。

表 2 各深度的分层沉降值与累计沉降值
Table 2 Layered settlement and accumulated settlement value at each depth

土层 序号	深度 z/m	GB 法		JTS 法	
		分层沉降量 s_i/mm	累计沉降量 $\Sigma s_i/mm$	分层沉降量 s_i/mm	累计沉降量 $\Sigma s_i/mm$
①	1.8	51.4	51.4	83.8	83.8
	4.2	92.2	143.6	156.6	240.4
	7.2	159.8	303.4	224.3	464.7
②	10.2	159.7	463.2	205.0	669.7
	13.2	159.7	622.8	138.4	808.1
	16.2	158.3	781.1	235.1	1043.2
③	19.6	57.4	838.4	56.9	1100.13
	19.9	4.0	842.5	3.8	1103.91
④	21.4	17.7	860.1	16.6	1120.55
⑤	25.8	26.6	886.7	31.5	1152.09
⑥	33.5	104.7	991.4	115.4	1267.48
⑦	35.6	12.0	1003.4	12.4	1279.84
⑧	37.1	6.4	1009.8	68.9	1348.75
	41.3	60.4	1070.3	75.0	1423.74
	46.3	87.2	1157.4	106.8	1530.54
⑨	51.3	87.1	1244.5	108.0	1638.56
	56.3	81.3	1325.8	109.3	1747.82
	61.3	78.1	1403.9	86.6	1834.42
	66.3	73.7	1477.6	5.7	1840.15

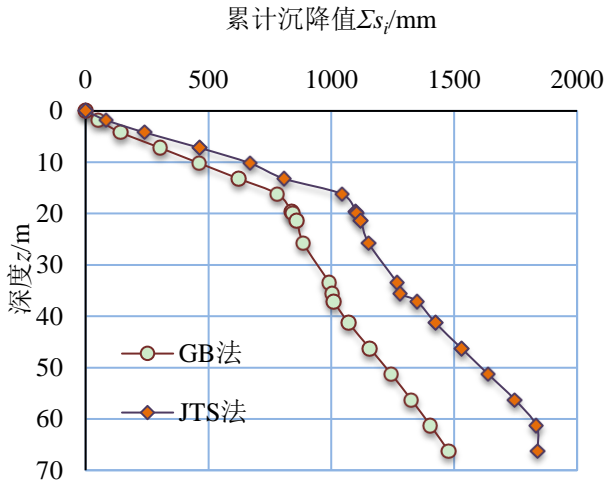


图 3 各深度 z 与累计沉降 Σs_i 的关系曲线
 Figure 3 Relation curve between each depth and accumulated settlement

2.4 经验系数取值

经验系数取值可按本文引言中的三个步骤进行。需注意的是：GB 法计算时不用表 1 中的 E_s ，由岩土勘察报告中压缩试验的 $e-p$ 曲线上计算对应于实际荷载的压缩模量值。JTS 法计算时需考虑真空压力的衰减，每延米的衰减量逐一试算。考虑到两种计算方法的经验系数都是未知数。需要有 2 个条件才解得。2 个条件为：①GB 法的经验系数应小于 1.0^[1]，JTS 法的经验系数宜取 1.0~1.3^[4]；两者之平均值宜小于 1.0；②2 条曲线基本重合。本例经几番试算后，使 2 条曲线逐渐靠拢，直至基本重合为止。其结果列于表 3，曲线图如图 4 所示。从中可见两法的经验系数满足条件①；2 条曲线基本重合，满足条件②。

2.5 用分层沉降实测值校核

(1) 分层沉降监测方法

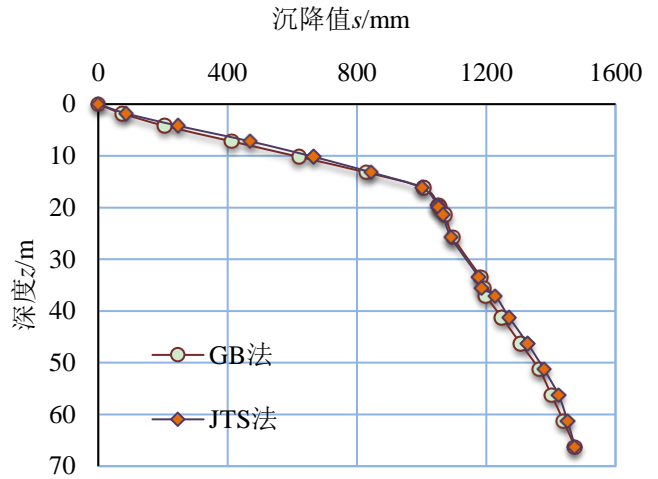


图 4 2 种理论计算方法试算成果图
 Figure 4 Trial results of two theoretical calculation methods

分层沉降监测工作采用电磁式沉降仪。其工作原理为：在真空预压区内的选定点钻一个 20 m 深孔，插入 PVC 管，在管外的土体不同深度处设置若干磁环（沉降环），土体沉降时，磁环随土体下沉，通过磁环位置的变化反映土层的沉降量。分层沉降的监测仪器包括沉降管、沉降环、相应的沉降仪、水准尺、水准仪等。电磁式沉降仪的灵敏度为 ± 1.0 mm，标尺误差小于 ± 1.0 mm/10 m，密封性能大于 1 MPa。每一孔中设 7 个环，各环的深度为 1.8 m、4.2 m、7.2 m、10.2 m、13.2 m、16.2 m 及 19.6 m。

(2) 分层沉降实测值

分层沉降仅在 20 m 塑料排水井的深度范围内监测，涉及的土层为①~③层，层②占绝大部分。经整理后得到的各深度处的实测沉降值和分层沉降值列于见表 4。为检验理论计算的准确性，将两种方法的理论计算结果也列于表 4 中。

表 3 变更法则后的理论计算结果

Table 3 Theoretical calculation results after changing the law

方法	GB 法	JTS 法
变更内容	压缩模量从 $e-p$ 曲线上 计算按实际压力计算得到	考虑真空压力的衰减， 衰减幅度为每延米 0.9 kPa
累计沉降量 $\Sigma s_i/mm$	1699.5	1411.4
经验系数	0.867	1.044
最终沉降值 s_c/mm	1473.5	1473.5

表4 分层沉降实测值与计算值一览表

Table 4 List of calculated values and measured values of layered settlement

土层 序号	深度 z/m	实测值		GB 法		JTS 法	
		分层沉降量	累计沉降量	分层沉降量	累计沉降量	分层沉降量	累计沉降量
		s_i/mm	$\sum s_i/mm$	$\psi_s s_i/mm$	$\psi_s \sum s_i/mm$	$m_s s_i/mm$	$m_s \sum s_i/mm$
①	1.8	81.2	81.2	73.4	73.4	86.6	86.6
	4.2	165.7	246.9	132.1	205.5	160.7	247.3
	7.2	218.0	463.9	207.9	413.4	222.8	470.1
②	10.2	214.1	650.3	207.7	621.2	196.3	666.4
	13.2	176.7	817.7	207.6	828.8	177.2	843.7
	16.2	129.6	967.3	178.3	1007.1	157.4	1001.1
③	19.6	35.7	1010.9	46.9	1054.0	48.1	1049.2

绘制深度 z 与分层沉降 s 关系曲线见图 5。

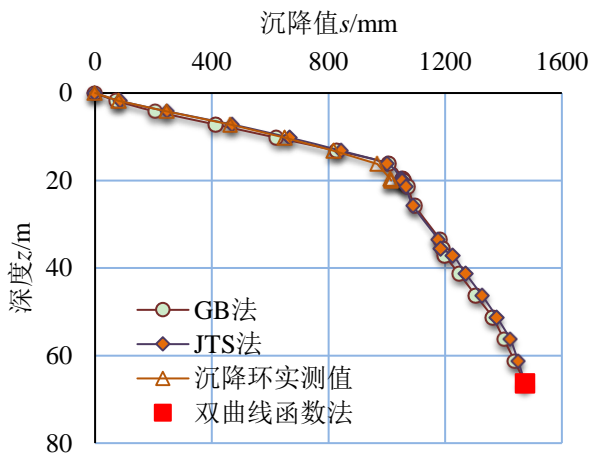
图5 深度 z 与沉降 s 关系曲线图

Figure 5 Relationship between depth and settlement

从图 5 中可见以下特点。

(1) 曲线呈一折线，三条曲线都在 $z=16.2\text{ m}$ 处转折，折点前后的线型接近直线形。

(2) 三条曲线基本重合，各深度的沉降值虽有差别，但差别不大。

(3) 分层沉降实测值是 $t=128\text{ d}$ 的值，不是最终值，故应小于理论计算的最终值。

(4) 与双曲线函数法推算的最终沉降值 $s_c=1473.6\text{ mm}$ 相比，这两种理论计算得到的结果十分接近。

3 结 语

(1) 以双曲线函数法推算的最终沉降值 $s_c=1473.6\text{ mm}$ ，以三点法推算的最终沉降值 $s_c=1188.5\text{ mm}$ ，前者较符合客观实际，后者偏小不宜采用。

(2) 采用国家规范 GB 50007-2011 的分层总和法计算沉降时，压缩模量不能直接用岩土勘察报告提供的 E_s 值，应该采用从岩土勘察报告中压缩试验 $e-p$ 曲线上的实际压力段的压缩模量。

(3) 采用行业标准 JTS 147-2-2009 的分层总和法计算沉降时，真空压力应考虑随深度的衰减，当缺乏实测的衰减资料时，可通过试算，从低到高选择合适的衰减值。

(4) 确定了沉降经验系数，就可确定最终沉降值。可用上述两种计算方法计算所得的深度 z 与沉降 s 的关系曲线，相互比对，调整各自的经验系数，逐步使之重合。GB 法的沉降经验系数 ψ_s 应该小于 1.0。JTS 法的沉降经验系数 m_s 宜取 1.0~1.3。两种方法的经验系数之平均值宜小于 1.0。本例所得的最终沉降值与实测值推算的结果十分接近，与分层沉降的实测值也比较吻合。

参考文献:

- [1] 地基处理手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 叶国良, 张敬, 孙万禾, 等. 排水固结法地基加固中的几点认识[C]//中国土木工程学会. 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集. 重庆: 2008.
- [3] 姜炎, 何宁. 地基处理监测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] JTS 147-2-2009 真空预压加固软土地基技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [5] 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [6] GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.