

排水固结法处理软土地基固结度 推算方法分析

张兴明^{1,2}, 尹长权¹, 时富禄¹

(1. 中国港湾工程有限责任公司,北京100027; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司,广东广州 510230)

摘要:不同工程对于工后沉降的要求不同。依托实际工程,结合软基处理过程中遇到的卸载标准理解不一致的问题, 采用双曲线法、三点法、Asaoka 法分别进行推算分析。结果表明:以固结度为主、沉降速率为辅的卸载标准较为合理;推 算固结度时三点法预测结果较大,取点时选取曲线平缓段时间间隔 25 d 为宜;双曲线法预测结果较小,但人为影响大,拟 合时需要对前期数据和异常数据进行剔除; Asaoka 法选取 5~10 d 间隔为宜,与实测结果较吻合。实际工程中,需要结合多 种方法和实际观测数据,综合判断软土固结度,以提升预测的准确性和可靠性。

关键词:固结度;沉降速率;双曲线法;三点法;Asaoka法 中图分类号:U655.54;TU472.3 文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0192-06

Calculation method of consolidation degree of soft foundation improved by drainage and consolidation method

ZHANG Xingming^{1, 2}, YIN Changquan¹, SHI Fulu¹

(1. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Different projects have different requirements for post-work settlement. The inconsistent understanding of unloading standards encounters in the process of soft foundation treatment. Relying on an actual project, we use the hyperbolic method, three-point method and Asaoka method to calculate and analyze respectively. The results show that the unloading standard is more reasonable with consolidation degree as the main and settlement rate as the supplementary. The prediction result of three-point method is larger when calculating the consolidation degree, and it is appropriate to choose the points with the time interval of 25 d in the gentle section of curve. The prediction result of hyperbolic method is smaller, but the human influence is large, and it is necessary to exclude the previous data and anomalous data in the fitting. The Asaoka method is appropriate to choose the interval of 5 to 10 d, so as to be in good accordance with the actual measurement results. In actual projects, it is necessary to combine a variety of methods and actual observation data to comprehensively judge the degree of soft soil consolidation, in order to improve the accuracy and reliability of the prediction.

Keywords: consolidation degree; settling rate; hyperbolic method; three-point method; Asaoka method

堆场建设和运营过程中,软土沉降影响深 远^[1-3]。在施工阶段,通常通过排水固结手段改善 软土的稳定性,以确保其在运营期间的沉降量能 控制在预期范围。固结度是一个关键的计算指标, 它对于采用排水固结技术进行软基处理的工程设 计至关重要,因为它直接影响工程的安全性和经 济性^[4]。

在工程实践中,评估固结度常用两种方法:

收稿日期: 2024-10-08

作者简介:张兴明 (1990-),男,硕士,高级工程师,从事岩土工程设计和研究。

 应力固结度是依据 Terzaghi 饱和土体渗流固结 的理论,被广泛采纳;2)应变固结度的计算则依 赖实际测量的沉降数据^[5-6]。

杨林松等^[7]指出在双曲线模型预测时,初始 预测值往往高于实际值,而在预测后期,最终沉 降量的推算值则可能低于实际值。指数曲线法选 取3个点推算最终沉降,受主观影响较大。Asaoka 法则因起点和时间间隔 Δ*t* 的选择不同,导致预测 结果出现差异^[8]。

本文依托广东省沿海地区的深层软土地基改 良工程实例,深入探讨多种固结度计算方法的优 缺点,提出卸载标准,缩短地基处理工期。研究 成果可为固结度和地基沉降推算提供指导,具有 较高的实用价值和推广意义。

1 地基沉降计算

1.1 主固结沉降计算

总沉降包括瞬时、主固结和次固结沉降。因 瞬时和次固结沉降影响较小,常忽略不计^[9-11]。可 按下式计算主固结沉降:

$$s_{\pm} = \begin{cases} \frac{C_{c}}{1+e_{0}} H \lg \frac{p_{0} + \Delta p}{p_{0}} & (p_{0} = p_{c}) \\ \frac{C_{r}}{1+e_{0}} H \lg \frac{p_{c}}{p_{0}} + \frac{C_{c}}{1+e_{0}} H \lg \frac{p_{0} + \Delta p}{p_{0}} & (p_{0} > p_{c}) \\ \frac{C_{r}}{1+e_{0}} H \lg \frac{p_{0} + \Delta p}{p_{0}} & (p_{0} < p_{c}) \end{cases}$$
(1)

式中: s_{\pm} 为主固结沉降,m; p_0 为地基自重应力与 外加荷载之和,kPa; p_c 为地基先期固结应力,kPa; Δp 为地基附加应力,kPa; C_c 为地基土层压缩指数; C_r 为地基土层再压缩指数; e_0 为地基土层初 始孔隙比;H为土层厚度,m。

1.2 残余沉降计算

设计时,常用式(1)分别计算 s_{e} 和 s_{ie} 。使用 期残余沉降 s_{e} 计算公式为:

$$s_{\mathfrak{K}} = s_{\mathfrak{K}} - u_{t,\mathfrak{k}} s_{\mathfrak{k}} \tag{2}$$

$$u_{t,\tilde{m}} = \frac{s_t}{s_{\infty}} \tag{3}$$

式中: s_使为使用期荷载条件下的主固结沉降, m;

 s_{ik} 为施工期荷载条件下的主固结沉降,m; $u_{t,ik}$ 为施工期t时刻的固结度; s_t 为t时刻沉降,m; s_{s} 为最终沉降,m。

1.3 固结度计算

S

在设计阶段, t 时刻沉降未知, 实际用应力固 结度 u_{tr} 替代应变固结度 u_{tr} 。

对于 u_{a} ,可按下式计算得出:

$$u_{\sigma} = 1 - (1 - u_{v}) (1 - u_{h}) \tag{4}$$

式中: *u_v*、*u_h*分别为竖向、水平向固结度。当现 场地层与假定不符时,固结度计算结果偏差较大。

在施工阶段,应变固结度 u_{ie} 可用监测沉降数 据推算。推算方法主要有三点法、双曲线法和 Asaoka 法。三点法求解土体沉降的计算公式见式 (5),再使用式(3)计算固结度。

$$= \frac{s_2(s_2 - s_1) - s_1(s_3 - s_2)}{(s_2 - s_1) - (s_3 - s_2)}$$
(5)

式中: s_{∞} 为最终沉降,m; s_1 、 s_2 、 s_3 为相同时间间隔的三点的沉降,m。

双曲线法求解土体沉降的计算公式见式(6)、 (7),再使用式(3)计算固结度。

$$s_t = s_a + \frac{t - t_a}{\alpha + \beta (t - t_a)}$$
(6)

$$s_{\infty} = s_{a} + \frac{1}{\beta} \tag{7}$$

式中: s_a 为满载时沉降,m;t为满载预压时间,d; t_a 为满载开始时间,d; α 与 β 为待定系数。当 $t \rightarrow +\infty$ 时,求解出 s_{∞} 。

Asaoka 法求解土体沉降的计算公式的见式(8), 再使用式(3)计算固结度。

 $s_{j} = \beta_{0} + \beta_{1} s_{j-1}$ (8) 式中: $\beta_{0} = \beta_{1}$ 为待定系数,由曲线拟合求解;

s_{j-1} 、 s_j 为等时间段 Δt 的沉降值, m_o

2 工程概况

某堆场工程,软基处理约40万m²。根据勘探 揭露,典型地质剖面见图1。主要地层描述:①₂ 淤 泥为灰色,饱和,平均厚度为5.97m;②₁ 淤泥为 灰色,饱和,平均厚度6.11m;②₂ 淤泥质土为 灰色,饱和,平均厚度3.92m;④₁黏土-粉质黏

SK08 8.09 CK08 7.20 $\frac{SK07}{6.47}$ ①,素填土 0.60(7.49) $\frac{CK07}{5.78}$ N=0N=0 N=0N=0=0-(=(①,淤泥 =0 =0 =0 =0=07.30(0.79) =0 =0Å7.20(0.00) =0≡0 7.40(-0.93) =0 =14 =0 =0=0 =16 =09.60(-3.82) 2)淤泥 -(=0 =4 中粗砂 =0 =(=5 =0-4-(10 =0 15.40(-8.93) 10/ -4-0 112 =0 12 17.10(-10.63) ④,黏土-粉质黏土 18.70(-10.61) =6 $\frac{1}{2}$ 18.50($-1\overline{1.30}$) =3 13 12 =6 14 13 =4 -21.40(-13.31) 14 **→**20.30(-13.83) -21.30(-14.10) 15 =7 =27 514 15 14 =28 16 15(22.00(-16.22) 15 =8 =22 16 =8 =27 ④,中粗砂 16 =29 =22 16 =9 =25 25.10(-18.63) 18 =28 9 =9 -27.50(-19.41) ④,黏土-粉质黏土 17 18 =10=26 =14 19 =10 18 27.80(-20.60) .18 19 =11 =10 =15 20 30.20(-22.11) 19 19 =10 =10 20, 30.20(-23.00) =13 =14 20 30.30(-24.52) =12 20, 30.50(-24.03) 注:N为标贯击数。 图 1 典型地质剖面 (单位: m)

土为灰色,饱和,平均厚度 6.68 m; $④_4$ 中粗砂 为灰色、局部灰白色,饱和,中密,局部稍密或

密实,未揭穿。主要土层的物理力学性质参数见表1。

Fig. 1 Typical geological section (unit: m)

主 1	十一十日的物理力学性氏会制	h
衣I	土安工层的物理力子性应参数	X

Tab. 1 Physical and mechanical property parameters of main soil layers

上目	湿重力密度	浮重力密度	直	固结快剪		固结系数/(10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)		
	$\gamma/(kN \boldsymbol{\cdot} m^{-3})$	$\gamma'/(kN{\boldsymbol{\cdot}}m^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	c′/kPa	$arphi'/(^{\circ})$	垂直 C _v	水平 C_h
①2 淤泥	14.9	8.0	4.1	0.9	3.4	12.1	0. 39	0. 58
②1 淤泥	14.9	8.2	6.3	1.2	4.7	12.7	0. 52	0.59
② ₂ 淤泥质土	16.9	11.1	13.9	2. 2	14.3	14.2	0.91	1.80
④1 黏土-粉质黏土	17.7	12.6	27.9	4.8	25.0	15.0	4.03	4.83
④4 中粗砂	20.0	10.0	0	30.0	-	-	-	-

地基处理标准:交工高程为 5.8 m, 疏浚淤泥 回填成陆,设计使用荷载 60 kPa, 50 a 内残余沉 降小于 25 cm。采用真空联合堆载法处理,C型排 水板,间隔 1.0 m 呈正方形布置,打穿软土层; 真空压力不小于 85 kPa;堆载采用覆水围堰加载, 围堰内水深不小于 1 m。

3 现场沉降监测

3.1 沉降监测布置

本文针对该工程的 A₅ 施工区域的地面沉降情况。在该区域,共安装了 15 个地面沉降监测仪器,这些仪器以约 50 m 的间隔均匀分布。此外,为了全面评估地基处理的效果,该区域还设置了

孔隙水压力监测点和一系列土工测试点,包括标 准贯入试验、土壤样本采集、十字剪切板测试和 荷载板测试点。监测点平面布置见图 2。



图 2 监测点平面布置

Fig. 2 Layout of monitoring points

在预压期进行沉降监测,当场地抽真空时间 达到120 d,连续10 d,平均小于1.5 mm/d,可以 根据沉降数据推算最终沉降量、固结度和残余沉 降。当固结度不低于88%,便可以停止加载。

3.2 沉降情况监测结果

根据设计要求,沉降板监测频率为试抽真空期间1次/d,抽真空期间1次/3d,卸载前15d期间 1次/2d;孔隙水压力监测频率为试抽真空期间 1次/d,其余时间1次/3d。

A₅ 区满载时间达 134 d 后,连续 10 d 平均沉 降小于 1.5 mm/d。监测场地沉降曲线见图 3。因 1[#]~9[#]点靠近地基处理边界,边界为回填护岸,软 土厚度较小,因此沉降也较小。



Fig. 3 Monitoring settlement curves

4 固结度计算优化分析

4.1 固结度推算

合理准确地推算固结度对于软土地基设计至 关重要。为确保本工程顺利实施,选择合理的沉 降数据,对最终沉降和固结度进行推算。

使用三点法推算,时间间隔越大,土体固结 度越小,表明预测结果愈保守。因软土初始孔隙 率大,加载初期日均沉降大,若将数值点选在曲 线下降端,会使固结度计算结果失真。经多次试 算,与现场实测沉降值比较后发现,三点法宜在 沉降曲线平缓后段选用, s₃ 尽量选在曲线末端。 综上, 宜选取 25 d 时间间隔进行计算。

使用双曲线法推算,通过识别曲线上的两 个转折点,可以拟合出一条直线,该直线的参 数与固结度相关。需要对初始数据和异常数据 进行剔除,剔除后计算结果越精确,4*点相关 系数 *R*²由 0.971 2 增大到 0.988 4,计算的最终沉 降为 581 mm; 10*点相关系数 *R*² 为 0.996 6,计算 的最终沉降为 1 447 mm,双曲线法拟合结果见 图 4。



图 4 双曲线拟合结果 Fig. 4 Fitting results of hyperbolic method

使用 Asaoka 法推算,选取 5、10 d 时间间隔,固结度差别很小,满足精度要求。于是选取 5 d 时间间隔,选择相关系数 R² 最接近 1 的固结度作为最终预测值。Asaoka 法拟合结果见图 5。

最终各监测点沉降和固结度沉降和固结度计 算结果见表 2,其中三点法是依据实测的沉降数 据, Δt 选用 10 d 而得出的计算结果。对比表 2 的 计算结果可知, 三点法计算得到的固结度偏大, 与实际沉降偏离。采用 3 种优化方法计算的固结 度均满足设计要求。对卸载后的场地进行取土试 验和原位测试, 软土地基处理前后试验指标见 表 3。



Fig. 5 Fitting results of Asaoka method

	表 2 沉降和固结度计算结果
Tab. 2	Calculation results of settlement and consolidation degree

							8		
沉降 实测		监测单位计 <mark>算</mark>		三点法		双曲线法		Asaoka 法	
监测点	沉降/mm	沉降/mm	固结度/%	沉降/mm	固结度/%	沉降/mm	固结度/%	沉降/mm	固结度/%
1#	363	366	99. 2	367	98.9	381	95.4	375	96. 9
2#	457	459	99. 5	459	99. 5	479	95.5	476	96.1
3#	475	486	97.8	490	97.0	495	95.9	495	96.0
4#	544	549	99.1	549	99.1	581	93.6	561	96. 9
5#	582	589	98.8	595	97.8	614	94. 8	606	96.1
6#	490	501	97.8	507	96.6	511	95.8	509	96.2
7#	484	496	97.5	491	98.5	512	94. 5	498	97.2
8#	470	474	99. 2	479	98.2	489	96. 2	480	97.9
9#	538	547	98.4	546	98.5	557	96.6	552	97.5
10#	1 299	1 308	99.3	1 311	99.1	1 447	89. 8	1 378	94.3
11#	1 283	1 297	98.9	1 311	97.9	1 377	93. 2	1 346	95.3
12#	1 478	1 504	98.3	1 528	96.7	1 588	93. 1	1 551	95.3
13#	1 747	1 761	99. 2	1 786	97.8	1 864	93.7	1 805	96.8
14#	1 461	1 492	97. 9	1 505	97.1	1 535	95.2	1 516	96.4
15#	1 234	1 241	99.4	1 254	98.4	1 298	95.1	1 263	97.7

	表 3 软土地基处理前后土工试验数据对比
Tab. 3	Comparison of test data before and after soft soil foundation treatment

试验	物理指标			直剪快剪			
阶段	含水率/%	孔隙比	标贯击数/击	静力触探阻力/MPa	十字板抗剪强度/kPa	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
勘察阶段	84.30	2.347	0~1	0. 07	5.33	6.30	1.20
地基处理后	43.70	1.310	3~4	0. 72	22.80	8.55	8.42

4.2 固结度推算结果差异性分析

双曲线法、三点法和 Asaoka 法是用于推算软 土固结度的常用方法,但由于它们基于不同的数 学模型和假设条件,因此计算结果往往会存在差 异。双曲线法假设沉降速率与时间的倒数成线性 关系,适用于沉降速率较为稳定的情况,但它无 法很好地处理沉降初期阶段的非线性固结问题; 三点法则假设在短时间内沉降速率相对均匀,通 过3个相邻点推算出平均固结度,但由于计算仅 依赖于局部的3个点,对数据波动较为敏感,外部 扰动可能导致计算结果偏差较大; Asaoka 法假设沉 降过程满足渐近稳定的线性趋势,适合在沉降后期 的推算,对早期非线性固结阶段的适用性较差。

这3种方法在初始假设、数学处理方式以及 适用的固结阶段上有所不同,导致适用条件和结 果的准确性也存在差异。局限性在于它们对实际 土体的初始条件、外部荷载变化等因素的敏感性 不同,且无法充分考虑土体非线性压缩特性、排 水条件变化等复杂因素。

5 结论

 1) 排水固结法处理软基时,首先要求预压时 间不小于设计要求,其次固结度和沉降速率必须 同时满足要求。

2) 三点法宜在沉降曲线平缓段, s₃ 宜选在末端; 选取 25 d 时间间隔时与实际更吻合。

 3) 在使用双曲线法进行线性拟合时,需要对 初始数据和异常数据进行剔除,剔除后 R² 越趋近 于 1,则越接近实际情况。

4) 在使用 Asaoka 法对地基最终沉降量进行 对比时,分别选取5、10 d 时间间隔,计算所得的 固结度差别较小,均满足要求。

5)3种方法在不同的沉降阶段和沉降条件下 均存在局限性。在实际工程中,需要结合多种方 法和实际观测数据,综合判断软土固结度,以提 升预测的准确性和可靠性。

参考文献:

[1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业 出版社, 2008.

GONG X N. Foundation treatment manual [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[2] 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人 民交通出版社股份有限公司, 2017.

Code for foundation design on port and waterwayengineering: JTS 147-2017 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

- [3] 张明,杨永生.基于成长模型的吹填土软基沉降预测方 法研究[J].水运工程,2012(4):162-165,179.
 ZHANG M, YANG Y S. Settlement prediction of dredged fill foundation based on growth model[J]. Port & waterway engineering, 2012(4):162-165, 179.
- [4] 王华庆,苏静波,罗颖.预压固结地基单桩承载力随固结度变化的模拟[J].水运工程,2018(2):169-174.
 WANG H Q, SU J B, LUO Y. Simulation on load capacity of single pile changing with consolidation degree in vacuum preloading foundation [J]. Port & waterway engineering, 2018(2):169-174.
- [5] 陈富,陈默. 真空预压与真空井点降水用于软土处理的 机理差异[J]. 水运工程, 2024(4): 183-188.
 CHEN F, CHEN M. Mechanism difference between vacuum preloading and vacuum well dewatering for soft soil treatment [J]. Port & waterway engineering, 2024 (4): 183-188.