

双曲线法在墨西哥维拉克鲁斯港地基处理沉降预测中的应用

闫继朋 欧阳研研

上海港湾工程质量检测有限公司 上海 201315

【摘要】：当采用堆载预压法处理软土地基时，常用固结度和地基承载力来评价地基处理效果。本文通过对墨西哥维拉克鲁斯港围海吹填形成的陆域进行地基处理后的固结度计算及20年后沉降预测，验证了软粘土双曲线法在沉降预测的应用，为以后类似工程的施工、设计起指导作用。

【关键词】：双曲线法；固结度；堆载预压法；沉降预测

堆载预压法在港口工程、工民建、机场跑道等地基处理中广泛使用，加固效果较好且取得较好经济效益，国内在这方面积累了大量实践经验。预压过程中需要计算固结度以及预压加固完成后的残余沉降(工后沉降)，计算固结度及沉降预测就显得格外重要了。通常分层总和法计算的最终沉降量不考虑土体侧向膨胀压缩的变化求得，常常小于实测值，而根据实测沉降资料推算的最终沉降量和实际更为接近、可靠。本文采用双曲线法分析墨西哥维拉克鲁斯港 ICAVE 集装箱码头后方堆场围海吹填成陆堆载预压后的地基沉降固结情况及发展趋势，验证此法对施工的指导作用。

堆载预压法在港口工程、工民建、机场跑道等地基处理中广泛使用，加固效果较好且取得较好经济效益，国内在这方面积累了大量实践经验。预压过程中需要计算固结度以及预压加固完成后的残余沉降(工后沉降)，计算固结度及沉降预测就显得格外重要了。通常分层总和法计算的最终沉降量不考虑土体侧向膨胀压缩的变化求得，常常小于实测值，而根据实测沉降资料推算的最终沉降量和实际更为接近、可靠。本文采用双曲线法分析墨西哥维拉克鲁斯港 ICAVE 集装箱码头后方堆场围海吹填成陆堆载预压后的地基沉降固结情况及发展趋势，验证此法对施工的指导作用。

1 工程概况

墨西哥维拉克鲁斯港 ICAVE 集装箱码头位于墨西哥湾，为墨西哥东海岸上大港口之一。本工程区域为原始海床上的围海吹填成陆，吹填后顶标高约+4m，原海床面自海侧向岸侧缓慢倾斜，标高在-7m至-4m。现场采用3种地基处理方式，靠近码头结构处采用振冲，处理深度10米；与振冲区相邻区域采用强夯，夯能3750kN·m；靠陆地一侧采用强夯方法，夯能3150kN·m；场地南侧附近在标高-14m至-22m处存在较深厚软土，采用堆载预压后强夯地基处理方式，堆载顶标高+14m，强夯夯能3750kN·m。

堆载预压区计划加载6个月，通过监测数据的结果决定

是否继续加载。竣工后的沉降数据需要满足设计要求。该区域共布设有3个断面(每个断面4个沉降板)，共计12个沉降板。沉降板低位于原状土表面(+5.0m)，堆载高度9m。加载期每天观测一次，其他时间2d/次(每周至少两次)。

2 监测目的

(1) 为了确保堆载预压过程中的下卧土层稳定性，进行埋设沉降板等进行原状土表层沉降观测，通过实时数据反映控制堆载速率。

(2) 根据实测数据确定堆载荷载作用下土体固结度、预压期沉降速率及总体沉降量，记录堆载荷载作用过程中的土体状态变化，并预测未来20年沉降量，验证是否满足设计要求，为卸载时间确定提供依据。

(3) 验证双曲线法在高压缩性软粘土在堆载预压法地基处理的效果的应用，为以后类似工程积累经验。

3 双曲线法及固结度计算原理

(1) 双曲线法

常用的沉降预测方法主要有三种。第一种为采用简化固结公式计算固结度，然后推算沉降发展趋势的分层总和法；第二种为根据固结理论结合土体的本构模型计算最终沉降量及其发展趋势的方法。这两类方法需要通过大量室内三轴试验和单向固结试验获得相关参数，实际工程获得比较困难，且和实际情况有所出入。第三种为根据现场实际观测资料预测软粘土的最终沉降量和固结度，如传统拟合曲线的指数曲线法、双曲线法、三点法、Asaoka法等。此外，近年来，灰色预测法、逻辑法和Gompertz模型等基于新理论的新方法被引入改进沉降的预测。高压缩性软粘土的应力应变关系呈非线性关系，固结过程并不一定符合指数曲线。魏汝龙认为软粘土压缩曲线形状更符合双曲线，而不是半对数曲线。Sridharan等认为当 $0.6 < U < 0.9$ 时， U 与时间因子 T 之间的关系可以用等轴双曲线表示。对于本工程，监测时间并不长，

虽然满载的时间线清晰，二次固结并不明显，我们采用“双曲线法”来计算最终能够沉降量。

双曲曲线的理论背景如下：双曲线法通常假定沉降量与时间成双曲线递减的关系。

软粘土在 t 时刻的沉降可以用下式计算：

$$st = s_0 + \frac{t-t_0}{\alpha + \beta(t-t_0)} \quad (1)$$

将（1）式进行转换可得：

$$\frac{t-t_0}{s-s_0} = \alpha + \beta(t-t_0) \quad (2a)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时，(1)式的极限求得最终沉降量：

$$s_{\infty} = s_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2b)$$

其中， st 为 t 时刻的沉降量， s_0 为 t_0 时刻的沉降量， t_0 为加载完成后所取得任一时间（s）， α 和 β 可根据实测资料采用图解法回归求出，然后使用它们计算最终沉降量。

（2）固结度

固结度可以根据沉降量实测数据及规范经验公式计算卸载时的固结度是多少。某时刻 t 的固结度可以用 t 时刻沉降板实测沉降 s_d 和最终沉降量 s_{∞} 的比值求得，即 $U = \frac{s_d}{s_{\infty}}$ 。

4 工程实例计算分析

沉降板采用 $0.5m \times 0.5m$ 钢板，厚度 6mm，沉降测杆采用 19mm 镀锌钢管，外套保护管采用直径 50mm 钢管。沉降杆底部与沉降板中心焊接，并且确保沉降板和沉降杆处于垂直状态，沉降保护管与沉降板不固定，沉降测杆可以在沉降保护管内自由上下运动。

根据设计要求，现场放样沉降板埋设位置，并用 10cm 左右砂垫层找平，以确保沉降杆与地面垂直。测量沉降杆顶标高，作为初始值，并随着土体堆载高度接高，接高测杆长度以 0.5m 为宜。沉降观测采用水准仪法进行，按照 4 等水准控制，或者用 1 秒精度以上全站仪扫。但是后期为卸载提供依据时必须采用水准仪法进行观测，且观测中误差不得高于 1mm。

本文以典型断面 1 为例对该区域加载效果进行分析。堆载施工于 6 月 15 日开始，8 月 2 日结束。根据监测数据，sp4-1 到 sp4-4 的加载-沉降时程曲线见图 1，根据监测成果资料可知，断面 1 各监测点总沉降速度为每天 3.6 毫米至 4.8 毫米。

各沉降板的沉降相对均匀。截止到 10 月 31 日的累积沉降值从 477 毫米到 632 毫米，在恒载阶段（从 8 月 2 日到 10 月 31 日），该区域的沉降量很小，沉降速率小于 0.2mm/d。

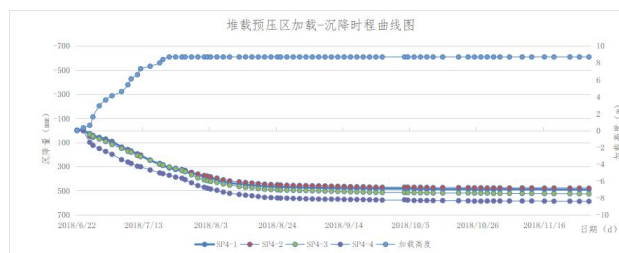


图 2 堆载预压区断面 1 加载-沉降时程曲线

5 固结度和后期沉降估算

满载时间开始于 8 月 2 日，对应沉降量为 s_0 ， t 时刻的沉降量 s_p 采用的为 10 月 31 日观测值，建立曲线拟合方程，确定曲线方程参数 α 、 β 。然后根据沉降板观测数据计算最终沉降量及固结度，如表 1 所示。

表 1 沉降监测点最终沉降量及固结度

监测点	SP4-1	SP4-2	SP4-3	SP4-4
满载时沉降量 s_0 (mm)	388.0	379.0	418.0	480.0
t 时刻沉降量 s_p (mm)	490.0	477.0	523.0	586.0
α	7319	10092	11091	9391
β	0.0088	0.0089	0.0081	0.0082
最终沉降量 s_{∞} (mm)	501.1	491.6	541.7	602.3
残余沉降量 s_r (mm)	11.1	14.6	18.7	16.3
固结度 U (%)	97.8	97.0	96.5	97.3

6 沉降预测

相关参数 α 和 β 的值已在表 1 中求得，我们可以用公式（1）来对该区域 20 年后的沉降情况进行预测，计算结果如表 2 所示。

表 2 沉降量汇总表

监测点	SP4-1	SP4-2	SP4-3	SP4-4
20 年后沉降量 s_{20y} (mm)	500.9	491.4	541.4	602.0

残余沉降量	s_r -目前(mm)	11.1	14.6	18.7	16.3
	$s_r(30d)$ (mm)	8.4	11.1	14.5	12.2
	$s_r(1y)$ (mm)	2.3	3.2	4.2	3.5
	$s_r(5y)$ (mm)	0.6	0.8	1.0	0.8
	$s_r(20y)$ (mm)	0.1	0.2	0.3	0.2
未来20年沉降量(mm)		10.9	14.4	18.4	16.0

由上表可知, 20年后, 各沉降点累计沉降量与双曲线法公式(2a)预测的累计沉降量相差很小, 残余沉降量均小于1.0mm。t时刻的沉降量 s_p 采用的为10月31日观测值, 20年后各沉降点预测还会沉降14.1mm~18.4mm。

7 结果分析

通过堆载施工过程(加载、预压期)中的沉降板典型数据分析, 原始地面的沉降量随着加载而增长, 随满载预压而减缓, 整个沉降速率过程一直较有规律的发展。通过对沉降时

程曲线图的可知, 地基沉降在初始阶段较慢, 当荷载填达到一定高度时, 沉降随着加载高度的明显增大趋势; 当加载到预定高度, 地基处于预压期, 沉降又呈缓慢增加形式, 并逐渐趋于稳定。

根据预压后的固结度和预期沉降量, 可以地基处理是否满足设计要求(本文中设计卸载标准为场地所有监测点地表沉降速率<150mm/20年), 如果满足要求可建议进行卸载, 否则需要延长预压时间并进行观测。如表2所示, 未来20年的最大沉降点为SP4-3, 其沉降量为18.4mm, 符合设计要求。

从上述理论及实测资料的成果分析我们可以得出: 利用沉降实测数据采用双曲线法推算堆载预压区未来沉降量的结果还是比较理想的, 固结度在96.5~97.8之间, 沉降速率小于0.2mm/d, 符合《建筑地基处理技术规范》的要求地基固结度大于90%, 地面沉降速率小于0.5~1.0mm/d。

现场已经满足卸载, 要求为确保地基处理效果, 我们建议继续预压监测一个月, 然后可以卸载。

双曲线法计算固结度的时候, 曲线拟合度较好, 沉降预测基本符合实际, 计算结果偏于安全, 对实际工程有很大的指导意义。

参考文献:

- [1] 魏汝龙.从实测沉降过程推算固结系数[J].岩土工程学报,1993,15(2):8.
- [2] 中国交通运输部.真空预压加固软土地基技术规程(JTS147).人民交通出版社,2009.
- [3] 潘林有,谢新宇.用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J].岩土力学,2004,25(7):6.
- [4] 王天祥.4种真空预压土体固结度预测方法及其效果对比[J].水运工程,2019(S02):5.
- [5] Prakash K ,Murthy N S ,Sridharan A . Rectangular hyperbola method of consolidation analysis[J]. Géotechnique, 1987, 37(3):355-368.