



# 鱼山围垦工程地基处理深层加固效果分析

夏昊凉, 徐俊

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 大面积深厚软土地基处理过程中, 如何预测塑料排水板未打穿部分的沉降量是工程设计过程中的一个难题。依托鱼山围垦工程地基处理过程, 结合施工开始至交工后一段时间内的沉降观测资料, 对典型区域的沉降及沉降历程进行详细分析, 将实测沉降数据推算出的最终沉降量与理论计算出的最终沉降量进行对比, 并对深层塑料排水板的加固效果进行分析。结果表明, 一定深度以下的塑料排水板的排水效率迅速衰减, 导致固结速率落后于理论计算的速率; 用双曲线法结合实测资料反算最终沉降量时, 应对板下区的沉降进行修正。

**关键词:** 塑料排水板; 最终沉降量; 深厚软土地基

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0053-03

## Analysis of deep reinforcement effect of foundation treatment in Yushan reclamation project

XIA Hao-liang, XU Jun

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** How to predict the partially penetrated settlement of soft soil under plastic drain plate is a difficult problem in the design of large area thick soft soil foundation treatment process. Based on the foundation treatment process of the Yushan reclamation project, we combine with observation data of settlement from the beginning of construction to the end of construction, analyze the settlement and settlement history of typical areas, compare the final settlement calculated by the measured settlement data with that calculated by the theory, and analyze the reinforcement effect of deep plastic drainage plate. The results show that the drainage efficiency of the plastic drain plate below a certain depth rapidly attenuates, resulting in the consolidation rate falling behind the theoretical calculation rate. The settlement under the plate should be corrected when the final settlement is calculated by the hyperbolic method combined with the measured data.

**Keywords:** plastic drainage plate; final settlement; thick soft soil foundation

### 1 工程概况

大、小鱼山地处舟山群岛西北部、岱山岛的西侧; 鱼山围垦工程位于大、小鱼山岛之间的海域。该工程建设红线总面积 753 万  $\text{m}^2$ , 其中 81 万  $\text{m}^2$  场地为大、小鱼山开山形成的陆域, 大、小鱼山之间的 672 万  $\text{m}^2$  海域通过回填开山石料形成陆域。鱼山围垦工程根据建设时序以及使用功能共划分为 11 个区块, 采用塑料排水板结合堆载预压方案进行

地基处理。塑料排水板插板深度 15~30 m, 堆载料和回填料采用大、小鱼山开山石料, 堆载顶高程 5.5~8.0 m。一期工程于 2016 年 6 月开工建设, 2018 年 12 月底建成投产。

### 2 地质条件

根据该工程地质勘察资料, 钻孔深度范围内揭示土层自上而下依次为: ①<sub>2</sub> 灰黄-褐黄色素填

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 夏昊凉(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程设计。

土；③<sub>1</sub>灰黄-灰色淤泥；③<sub>2</sub>灰色淤泥质粉质黏土；③<sub>21</sub>灰-灰绿色粉砂；④<sub>1</sub>灰色粉质黏土；④<sub>11</sub>灰色粉砂；④<sub>2</sub>灰色砂质粉土；⑤灰黄-灰色粉质黏土；⑤<sub>1</sub>灰黄色含黏性土砾石；⑥灰色粉质黏土；⑦灰黄色粉砂；⑧灰色粉质黏土；⑨<sub>2</sub>杂色强风化凝灰岩；⑨<sub>3</sub>杂色中等风化凝灰岩。

浅层的③<sub>1</sub>灰黄色淤泥和③<sub>2</sub>灰色淤泥质粉质黏土累计厚度达到 15~30 m，该两层土体含水量高、压缩性高、强度低、排水固结缓慢，属于中高灵敏度软土，是建设区域的主要不良地基土层。

3 地基处理方案

3.1 设计标准

陆域形成交工高程为 3.7 m。地基处理工后沉降小于 50 cm。

3.2 设计方案

3.2.1 陆域形成

本工程陆域形成材料为吹填砂，吹填砂高程为 2.0 m，其中顶部吹填砂须保有不小于 2 m 厚的细砂层，作为后续地基处理的水平排水垫层。

3.2.2 地基处理

本工程地基处理采用排水板+堆载预压，具体方案为：1) 竖向排水通道由 C 型塑料排水板组成，呈正方形布置，间距 1.2 m，原则上打穿下卧软土层；2) 水平排水通道为 2 m 厚细砂层；3) 分区堆载高程 5.5~8.0 m；4) 稳压时间不小于 5 个月，同时根据沉降曲线推算土体固结度大于 90% 后，卸载至高程 3.7 m。

4 最终沉降量计算

围垦工程 5# 地块的监测周期为 1 年，沉降观测曲线包含发展以及收敛等典型历程，选取 5# 地块作为本文的研究地块。此地块的塑料排水板设计底顶高程为 2.0 m，设计底高程为 -28~-20 m。塑料排水板原则上穿透③<sub>2</sub>灰色淤泥质粉质黏土层，未进入⑤灰黄-灰色粉质黏土层。

根据《港口工程地基规范》<sup>[1]</sup>，地基最终沉降量可按下式计算：

$$S_{d\infty} = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \tag{1}$$

式中： $S_{d\infty}$  为地基最终沉降量设计值； $m_s$  为修正系数，按经验选取或由现场试验确定； $e_{1i}$ 、 $e_{2i}$  分别为第  $i$  层土受到平均自重应力设计值、平均最终应力设计值压缩稳定时的孔隙比设计值，可取均值； $h_i$  为第  $i$  层土的厚度。

地块分级加载固结度可按下式进行计算<sup>[2]</sup>：

$$U_{rz} = \sum_{i=1}^m \left( U_{rzi} \left( t - \frac{T_i^0 + T_i^f}{2} \right) \frac{P_i}{\sum_{i=1}^m P_i} \right) \tag{2}$$

式中： $U_{rzi} \left( t - \frac{T_i^0 + T_i^f}{2} \right)$  为瞬时加荷条件下，对应于第  $i$  级荷载  $t$  时刻的平均应力固结度，其中  $t$  为对应第  $i$  级分级加荷起点计算的分级加荷固结时间， $T_i^0$  为第  $i$  级荷载加荷的起始时间， $T_i^f$  为第  $i$  级荷载加荷的结束时间，当计算加荷期间的应力固结度时， $T_i^f$  应改为  $t$ ； $P_i$  为第  $i$  级预压荷载，当计算加荷期间的应力固结度时， $P_i$  应改为  $\Delta P_i$ ， $\Delta P_i$  为对应于第  $i$  级荷载加荷期间  $t$  时刻的荷载增量。

根据上述计算公式及地质条件、塑料排水板设计参数及上部堆载的加载情况，5# 地块的计算最终总沉降量见表 1。

表 1 最终沉降量计算值

钻孔	施工期结束时 总沉降量/m	最终总沉降量/ m
WD26	1.77	2.01
WD27	1.75	1.97
WD29	1.83	2.19
LB50	1.67	1.87
BB112	1.78	2.24
BB118	1.55	1.76

5 实测沉降资料

5# 地块在堆载预压过程中设置了表层沉降、分层沉降及孔隙水压力监测设施，用于观测下卧软土层的沉降量和沉降速率，并推算土体固结度。5# 地块的分层沉降观测孔于 2016 年 10 月下旬开始钻孔埋设，于 2016-10-26 全部完成。分层沉降测试工作从 2016-11-03 开始进行。5# 地块土体沉降量、分层压缩量见表 2、3。

表 2 5#地块的累积沉降量 mm

测点	2016-10-12	2017-03-31	2017-10-08
CJ5-1	0	815	986
CJ5-2	0	888	962
CJ5-3	0	926	1 001
CJ5-4	0	1 000	1 170
CJ5-5	0	960	1 140
CJ5-6	0	1 092	1 160
CJ5-7	0	980	1 153
CJ5-8	0	997	1 080
CJ5-9	0	1 053	1 149
CJ5-10	0	1 006	1 187
CJ5-11	0	938	1 115
CJ5-12	0	907	1 080
CJ5-13	0	985	1 113
CJ5-14	0	1 088	1 221
CJ5-15	0	1 287	1 392
CJ5-16	0	1 086	1 257
CJ5-17	0	1 137	1 218
CJ5-18	0	1 239	1 341
CJ5-19	0	1 058	1 152
CJ5-20	0	1 058	1 163
CJ5-21	0	1 193	1 367
CJ5-22	0	1 057	1 231
CJ5-23	0	1 155	1 277
CJ5-24	0	1 162	1 338
CJ5-25	0	1 318	1 482
CJ5-26	0	1 332	1 439
CJ5-27	0	1 359	1 459
CJ5-28	0	1 183	1 354
CJ5-29	0	1 170	1 340
CJ5-30	0	1 147	1 248
CJ5-31	0	1 104	1 273
CJ5-32	0	1 175	1 288
CJ5-33	0	1 310	1 424
CJ5-34	0	1 004	1 178
CJ5-35	0	1 137	1 247
CJ5-36	0	934	1 094

表 3 5#地块的分层压缩量 mm

测点	高程 -4~-1 m	高程 -7~-4 m	高程 -10~-7 m	高程 -13~-10 m	高程 -16~-13 m	高程 -19~-16 m
FC5-1	229	220	142	154	137	164
FC5-2	262	221	173	132	167	167
FC5-3	260	216	184	178	150	142

6 最终沉降量反向推演

基于土工试验指标的理论沉降计算值涉及的计算参数由室内试验测定时与工程实际通常存在很大的差异性, 需要根据监测数据进行反向推演, 推算天然软土地基处理最终沉降量和固结度。常规的推算计算模型主要有双曲线法、指数曲线法和 Asoka 法等。本次反向推演采用双曲线法推算土体最终沉降量和现状固结度, 并与基于分层总和法的沉降理论计算进行对比。

双曲线法是利用实测沉降数据推算满载稳定情况下地基最终沉降量的常用方法。该方法基于大量实测数据处理和数据分析, 假定堆载作用下吹填土地基的沉降速率随加载时间大致呈双曲线形式逐渐递减变化, 在堆载完成后任意  $t$  时刻相应的沉降量可用双曲线方程表示<sup>[3]</sup>:

$$S_t = S_0 + \frac{t-t_0}{(t-t_0)\beta + \alpha}$$

(3)

式中:  $S_t$  为任意  $t$  时刻对应沉降量;  $S_0$  为  $t=0$  时刻对应初期沉降量;  $t_0$  为所选取初始沉降对应时间;  $\alpha$ 、 $\beta$  均为与沉降时间和沉降量有关的经验系数。

表 4 5#地块表层沉降监测数据与相邻钻孔沉降理论计算值对比

监测点	最大累积 沉降量/mm	推算总 沉降量/mm	推算固结 度/%	监测点附近 钻孔编号	理论计算沉降量 (固结度 $U=85\%$ )/mm	理论计算 总沉降量/mm
CJ5-12	1 080	1 301	83	WD26	1 773	2 014
CJ5-11	1 115	1 340	83	WD27	1 750	1 975
CJ5-5	960	1 368	70	WD29	1 831	2 185
CJ5-17	1 218	1 300	94	LB50	1 670	1 874
CJ5-29	1 340	1 539	87	BB112	1 780	2 244
CJ5-23	1 277	1 410	91	BB118	1 552	1 756

7 加固效果分析

受制于工期等因素的影响, 5#地块在沉降曲线在未完全收敛时便进行卸载, 从实测的资料可看出, 在卸载至 60 kPa 后, 沉降速率迅速收敛并

保持稳定。其加固效果可从以下方面进行分析:  
1) 由于提前卸载, 导致堆载 1 a 后的最大累计沉降量偏小, 引起推算总沉降量较理论计算值偏小, 而推算固结度偏大。  
(下转第 150 页)