



基于 CPT 试验联合大型堆载试验的 地基沉降预测与分析

陈 胜¹, 邱青长¹, 廖宏志²

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;

2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 在土体满足承载力的要求下, 沉降量是地基处理过程中的主要控制标准之一。在多哈新港码头两种典型的地基上分别设计大型堆载试验, 通过较长时间的沉降观测, 得到了地基土的最终沉降值, 同时结合 CPT 试验, 运用分层总和法及参数反演法分析不同土层的压缩模量, 并进行沉降预测, 为本项目及类似工程的地基土沉降量预测提供依据。

关键词: 沉降量; 大型堆载试验; CPT 试验; 压缩模量

中图分类号: TU 434

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0057-04

Ground settlement prediction and analysis based on embankment test and cone penetration test

CHEN Sheng¹, QIU Qing-chang¹, LIAO Hong-zhi²

(1. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,

CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: When the bearing capacity of ground is satisfactory, the settlement is one of the other main criteria for the ground improvement. In Doha new port project, two embankment tests are designed respectively for two types of ground improvement areas, by which the settlement of each point after a long time is obtained. The settlement combined with CPT results is to be analyzed by splitting summation method and parameters inversion method to get the constrained modulus of the soil and then predict the ground settlement. The method presented provides a basis for this project and future similar projects.

Keywords: settlement; embankment test; CPT; constrained modulus

地基沉降预测通常采用室内试验或原位试验获取土层的压缩模量, 再根据分层总和法计算最终沉降量。由于室内试验受限于土样的扰动性, 很难获取原状土体的真实压缩模量, 因而往往不能得到较高精度的沉降预测值。因此, 在工程实践中, 一般采用原位试验如标准贯入试验、静力触探试验及荷载试验等结合一定的经验参数获取原状土体的压缩模量。通过原位试验对地基土进行沉降预测是最有效的方法之一, 但

是在计算过程中所采用的各种经验参数均基于不同土层的工程性质、工程地质条件等, 如果盲目地套用这些经验参数, 将可能导致沉降预测值与实际沉降值出现较大的偏差。多哈新港码头项目采用大型堆载试验分析两种典型地基的沉降特性, 并建立实测沉降数据与静力触探试验 (CPT) 端阻值之间的经验关系, 为 CPT 试验在本项目及类似的工程项目中更为可靠地预测地基沉降提供了依据。

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 陈胜 (1983—), 男, 工程师, 硕士, 从事岩土工程检测及监测工作。

1 工程概况

多哈新港码头项目位于卡塔尔多哈市东部约 35 km 的滨海沙漠平原上, 场地地势平坦, 地形起伏不大。码头地基的地层自上而下可分为: ①人工填土层, 厚度 2~3 m, 主要为中粗砂, 细颗粒含量小于 15%; ②砂土层, 厚度 3~6 m, 主要包含了中粗砂和粉质砂土, 局部出现细粒含量较大、塑性较高的粉土及黏土; ③基岩, 第 3 系灰岩, 在与覆盖层交界的区域一般为密实的碎石层。码头地基在港池抽水施工的影响下, 地下水水位降至岩面以下, 并在港池施工过程中基本保持不变。

本项目的地基处理方式主要为强夯法和振冲法, 地基处理验收标准是 50 kPa 大面积荷载下最终沉降量在 50 mm 以内。在地基土中, 细粒含量高的砂质粉土及黏土是较难处理的土类, 也是在大面积荷载作用下可能形成较大沉降的部分。集装箱码头 E 经过地基处理之后, 根据 CPT 试验结果分别选择两块较为典型的区域作为试验区: 1) 地基土由单一的砂土地层组成; 2) 地基土由细粒土地层与砂土地层组成, 细粒土土层在码头 E 区中最厚。

2 大型堆载试验

2.1 试验特点

大型堆载试验是一种较为直观的现场试验, 它类似于常规的平板载荷试验并具有如下的特点: 1) 加载材料为砂土, 可形成较为理想的柔性基础^[2]; 2) 堆载面积大, 反映出更大深宽范围内土层的工程性质; 3) 加载历时普遍较长, 可以更加真实地反映土层的最终沉降量; 4) 堆载体尺寸相比土层厚度较大, 地基土可视为处于较理想的一维压缩状态。

2.2 试验内容及步骤

试验区堆载体的高度为 4 m, 顶部尺寸为 30 m×30 m, 底部尺寸为 38 m×38 m (图 1)。为保留一定的安全系数, 满载后试验荷载不小于 70 kPa, 即最大荷载达到设计荷载的 1.4 倍以上。

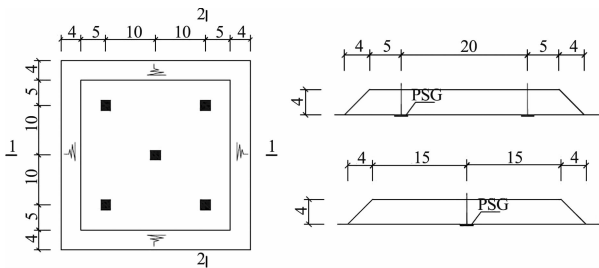


图 1 堆载尺寸及沉降板布置 (单位: m)

试验内容主要包括 3 部分: 检测、加载、沉降观测。土体检测主要指: 各个沉降板中心点的 CPT 试验; 每个试验区中心点的勘察钻孔和室内试验; 加载土体每一层碾压面上的换砂法试验。试验区分 4 级加载, 每级加载完成后至少 24 h 再进行下一级加载, 确保地基土在上一级荷载下沉降已经达到稳定。沉降观测从沉降板安装后立即开始, 每加载一次读取一组数据, 在加载完成后按照一定的频率进行观测, 并在沉降-时间曲线达到较为平稳状态时终止试验。

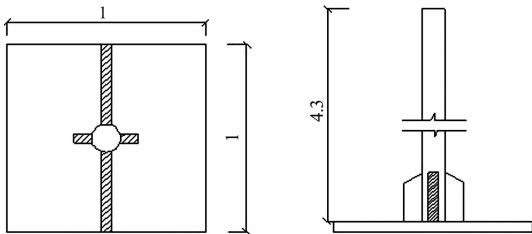


图 2 沉降板 (单位: m)

2.3 试验结果

2.3.1 试验荷载

试验区每级加载体为 1 m 厚的填土层, 每层填土的天然密度 (即相应的分级荷载值) 由换砂法试验确定。A、B 试验区加载情况见表 1。

表 1 试验区分级荷载				kPa
试验区	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级
A 区	19.894	40.474	59.192	76.93
B 区	19.894	38.318	56.35	74.97

2.3.2 沉降-时间曲线

本次试验中, A 区一共持续了 47 d, B 区一共持续了 91 d。A、B 试验区的沉降-时间曲线见图 3~5。

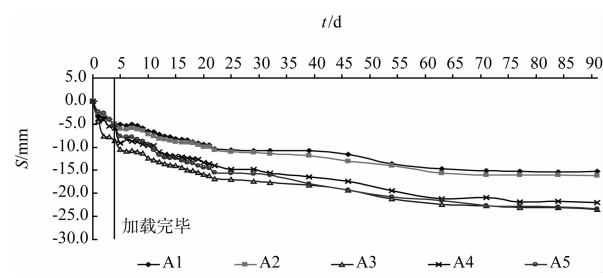


图 3 试验 A 区沉降-时间曲线

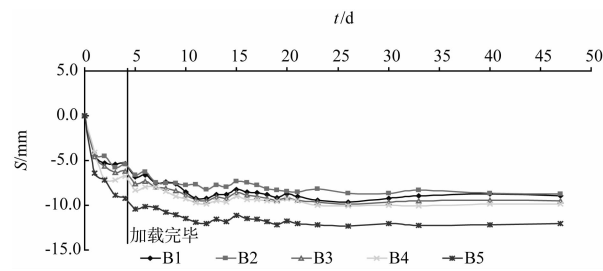


图 4 试验 B 区沉降-时间曲线

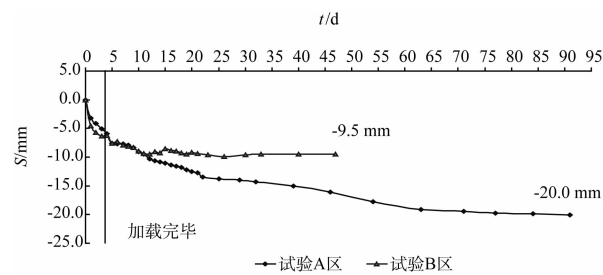


图 5 试验 A 区与试验 B 区各点平均沉降-时间曲线

A 区在大面积荷载作用下, 地基沉降过程持续时间较长 (图 3), 该区各点的沉降值在 2 个月

后逐渐趋于稳定。B 区地基沉降在加载的过程中已经基本完成, 各点在满载后的沉降曲线趋于平直线段 (图 4)。在两个试验区中不同观测点的沉降值具有一定的差异性, 如 A1 与 A2 点的沉降值比同区其它观测点明显偏小, 而 B5 点比该区其它观测点明显偏大, 分析其原因主要有: A1 与 A2 点的细粒土层较同区其它点都薄; 而 B5 点表层土体较为松散, 附加应力较其它各点更高。

从图 5 可知: A 区沉降历时长, 总沉降量大; B 区沉降历时短, 总沉降量小; 在加载过程中, A 区与 B 区的沉降量基本相同, 而在试验结束后, 两区的平均沉降值相差了 10.5 mm; A 区在满载后 3 个多月沉降值趋于稳定; B 区在满载后 1 d 的沉降值就达到了 7.6 mm, 完成了最终沉降量的 80%, 并在满载后 7 d, 沉降值趋于稳定。

3 地基沉降预测

3.1 土层参数

试验区各点的 CPT 端阻值见图 6、7, 同区各点的地层变化不大, 检测点的深度、土层的分布及软硬层出现的深度相近。A 区钻孔的土层分层结果 (表 2) 中细粒土与邻近的 CPT 点位细粒土的分布层位基本一致。

表 2 钻孔的土体分层及原位试验结果

孔号	深度/m	土层	细颗粒含量 (< 0.063 mm) /%	液限/%	塑性指数/%	CPT 判别土类
BH-A	1.5 ~ 1.8	中粗砂	8			9
	6.3 ~ 6.6	粉土	77	59	24	5
	7.1 ~ 7.4	黏土	95	52	34	3
	7.8 ~ 8.1	中粗砂	19			9
BH-B	1.5 ~ 2.0	中粗砂	7			8
	4.2 ~ 4.5	中粗砂	18			8

注: CPT 判别土类基于文献[1]所提的土类判别方法。

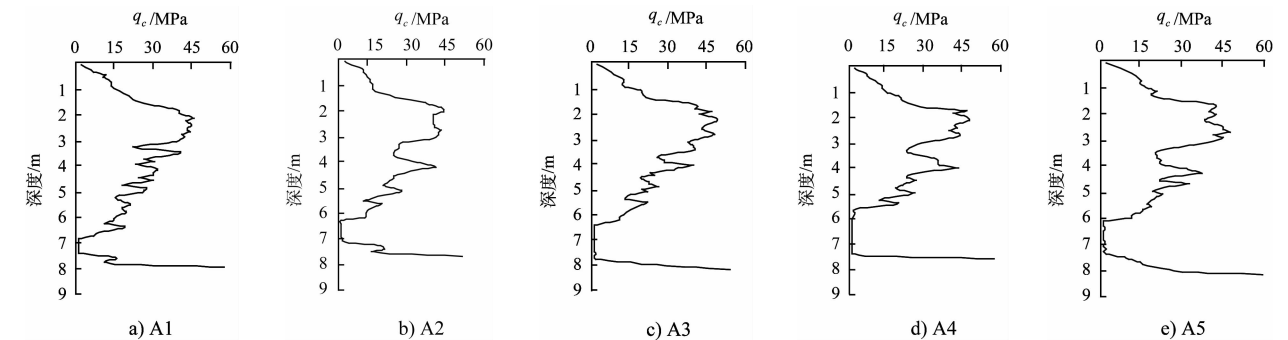


图 6 A 区各点 CPT 端阻值

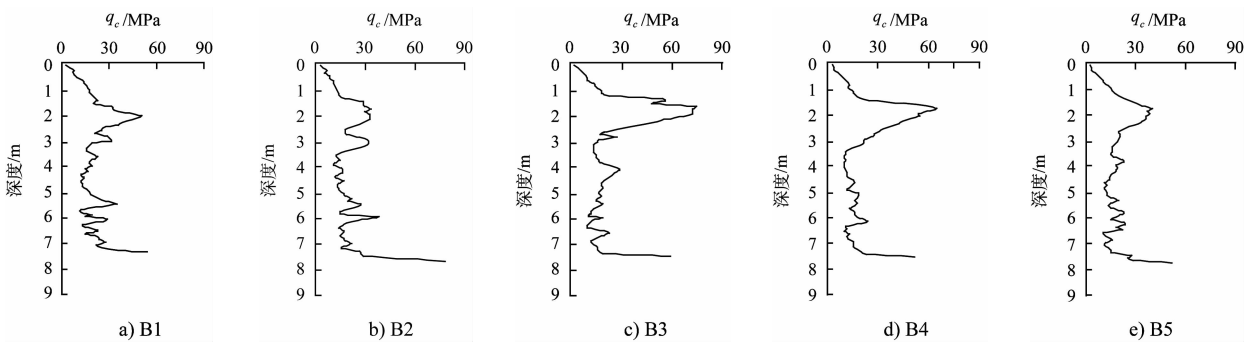


图 7 B 区各点 CPT 端阻值

从表 2 可知：两个试验区的粗粒土均为细粒含量小于 20% 的砂性土；A 区包含一层细粒含量 77% ~ 95% 的细粒土，由高塑性的粉土和黏土（MH，CH）组成。

3.2 参数反演及沉降预测

土体沉降量可由以下公式计算：

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{E_{si}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{a q_{ci}} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{q_{ci}} \tag{1}$$

式中：S 为最终沉降量；ΔP_i 为第 i 层土的平均附加应力；Δh_i 为第 i 层土的厚度；E_{si} 为第 i 层土的压缩模量；a 为压缩模量与 CPT 端阻值的经验参数；q_{ci} 为第 i 层土的平均端阻值。

土体的压缩模量与 CPT 端阻值的经验参数 a 可以由以下公式计算：

$$a = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{q_{ci}} \tag{2}$$

式中各项参数均与式(1)相同。根据工程性质对地基土进行分类，并用式(2)计算出经验参数，若存在多种工程性质差异较大的土类，可代入式(1)，通过数值拟合法如最小二乘法分析得出经验参数。本文 A、B 试验区的粗粒土可作为一类土层，A 区中的高塑性粉土及黏土作为同一类土层（类似分法可见文献[3]中 Mitchell、Gardner 的细粒土压缩模量表）。

B 区各点反演计算结果见表 3，粗粒土 a 值为 B 区各点的平均值。根据 B 区的粗粒土经验参数 a，对 A 区中 A1、A2、A3 点进行反演计算，结果见表 4，细粒土 a 值取 A1、A2、A3 点的平均值。A 区的 A4、A5 点可根据以上得出的粗粒土与细粒

土经验参数值由式(1)计算沉降量，结果见表 5。沉降计算及参数反演过程中，设定如下参数：1) 分层厚度为 10 cm；2) CPT 端阻值为计算土层的平均值；3) 附加应力取各土层中心点对应的值；4) 计算深度为试验区整个覆盖层。

表 3 粗粒土经验参数 a 值

点号	实测沉降值/mm	$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{q_{ci}} / \text{mm}$	a 值
B1	7.9	31.4	4.0
B2	8.7	34.4	3.9
B3	12.1	39.3	3.3
B4	9.9	37.6	3.8
B5	8.9	36.9	4.1
平均值	9.5	35.9	3.8

表 4 细粒土经验参数 a 值

点号	实测总沉降值/mm	细粒土沉降值/mm	$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{q_{ci}} / \text{mm}$	a 值
A1	15.2	6.9	41.7	6.0
A2	16.2	8.3	47.5	5.7
A3	23.5	16.0	78.6	4.9
平均值	18.3	10.4	44.6	5.6

表 5 A4 与 A5 点沉降预测

点位	粗粒土沉降预测值/mm	细粒土预测沉降值/mm	预测总沉降值 S ₁ /mm	实测沉降值 S ₂ /mm	S ₁ /S ₂
A4	6.9	16.8	23.8	22.0	1.08
A5	8.2	12.4	20.6	22.3	0.92

由表 5 可知，A4、A5 点的沉降预测值与实测沉降值较为接近，两点的 S₁/S₂ 值均在 0.9 ~ 1.1，预测精度较好。因此，在多哈新港码头试验区中，通过参数反演对地基沉降进行预测是可行的，并具备一定的精度。