盐田港集装箱码头二期工程地基处理

常　璐　　张咏梅
（深圳市特皓建设基础工程有限公司，深圳，518000）（深圳市建筑科学研究所，深圳，518000）

提　要　盐田港集装箱码头二期地基处理工程在国内是规模较大的、复杂的地基处理工程，本文介绍了该工程地基处理的设计、施工、加固效果检测等情况，对类似的工程有一定的参考价值和指导意义。

一　工程概况

由盐田国际集装箱码头有限公司投资兴建的盐田港集装箱码头二期工程位于深圳市大鹏湾内，原一期工程东侧。建设规模为 3 个 5 万吨级集装箱泊位，集装箱年处理能力可达 120 万标准箱。场地总面积约 55 万平方米。场地内的设施主要由集装箱堆场、码头、办公楼、变电站、停车场、维修车间、及海关检查站等组成。设计要求处理后的地面标高为 4.2～4.4m，使用期内地基的沉降量不大于 300mm，20m 范围内差异沉降不大于 100 mm。

整个场地地貌特征属平原海岸类型，后由人工回填开山块石和混碎石的山皮土而成，场地标高为 4.5～5.3 m，在回填挤淤的过程中，人为的形成两个淤泥汇集区：1 号泥塘区和 2 号泥塘区，其中之 1 号泥塘表面为水塘，泥面标高为-3.5～2.0m，2 号泥塘区泥面标高与填土整平地面低 1.0m。因此整个场地由回填形成的陆域区和泥塘区组成，泥塘约占整个场地面积的 1/5，形成了较为复杂的地基情况和边界条件。整个场地的平面见图 1。

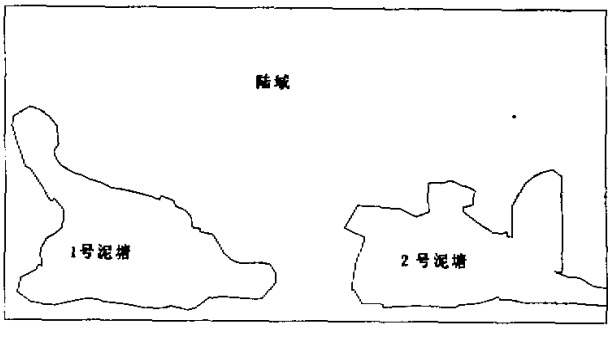


图 1　盐田港集装箱码头二期平面图

勘察结果表明，场地内的地层自上而下可划分为人工回填层、海相沉积层、陆相冲洪积层及基岩四层。地基主要土层的物理力学指标见表 1：

表 1 地基主要土层物理力学指标

指标 / 土层名称	土层厚度 (m)	含水量 ω (%)	容重 r (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	快剪 C (kPa)	快剪 Φ 度	固结快剪 C (kPa)	固结快剪 Φ 度	压缩系数 $a_{1\text{-}2}$ (MPa⁻¹)	无侧限 q_u (kPa)
素填土	6~15												
淤泥	0~12.8	59.3	16.3	1.67	44.5	23.4	1.68	7	0	13.5	12	1.66	9.6
淤泥质亚粘土	0~15.6	41.8	17.7	1.18	34.0	15.7	1.51	11	0.5	17	13	1.20	19.5
海相亚粘土	0~6.5	29.2	18.9	0.88	30.8	13	0.88	22	4.2	26	19	0.46	58.1
海相粗砾砂	0~5.8												
陆相粘土	0~3	31.6	19.1	0.90	40.6	21.3	0.58	35	13	32	19	0.38	142.0
陆相亚粘土	0~6.1	22.1	19.7	0.69	25.9	11.2	0.66	28	14	29	19	0.32	110.5
陆相粗砾砂	0~5.4												

注：淤泥及淤泥质土主要分布在两个泥塘中，陆域除个别地方外，下卧淤泥及淤泥质土厚度小于 4m。

二 地基处理

本工程地基处理的关键问题是：如何针对陆域区、泥塘区及泥塘边缘三种不同的地质条件，采用不同的、切合实际的处理方法，以期达到预想的效果。其中最主要的是使三个不同区域的工后差异沉降达到设计要求。

本工程由三航院设计，深圳市特皓建设基础工程有限公司施工，为了保证地基处理方案的实施及其处理效果，除了利用原勘察资料外，另在施工前对整个场地进行了详尽的补充勘察，采用的方法为地质雷达和钻探，地质雷达探测的范围是整个陆域、泥塘和泥塘边缘，钻探工作主要布置在泥塘边缘，根据探测资料，针对不同的地质条件和区域采用不同的地基处理方法。

1. 陆域区的地基处理

陆域区的回填料为块石和含大量碎石的山皮土，厚度 6～15 米。该区采用高能量强夯处理，采用履带式吊机，点夯锤径 2.2m，锤重 20000kg，设计要求强夯加固后地基土承载力标准值大于 180kPa。

对于回填料为块石的区域，强夯处理的单击夯击能为 5000kJ，4×4m 正方形布点，分四遍夯击，点夯三遍，满夯一遍，第一遍及第二遍点夯间距均为 8×4m，击数 10 击，

第三遍点夯间距为 4×4m，击数大于 6 击，要求第三遍点夯时的最后二击平均夯沉量不大于 5cm。 满夯单击夯击能为 1000kJ，击数 2 击。对于回填料为含碎石的山皮土，强夯处理的单击夯击能为 5000kJ、3000kJ 及 2000kJ，4×4m 正方形布点，分六遍夯击，点夯五遍，每点击数 28 击，满夯一遍，击数两击，第一遍及第二遍点夯间距均为 8×4m，击数 8 击，第三及第四遍点夯间距均为 8×4m，击数 13 击，第五遍及点夯间距均为 4×4m，击数 7 击，要求第五遍的最后两击平均夯沉量不大于 10cm。

通过强夯处理使回填土层得到明显压密加固，其强度得到提高，而且对回填土层下剩余淤泥及淤泥质土的压密和强度提高一定的效果。强夯后共进行 22 处地基土荷载试验，试验荷载为 540kPa， 所得典型 *P-S* 曲线见图 2。

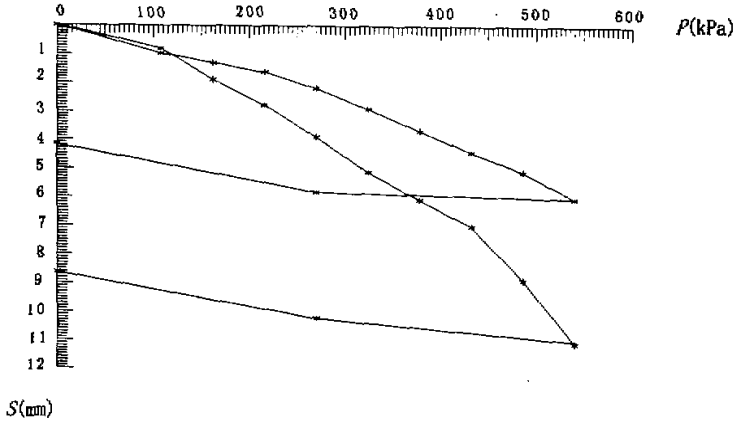


图 2 *P-S* 曲线

2. 泥塘区的地基处理

1 号及 2 号泥塘区的淤泥及淤泥质土厚度大，最厚处达 17.45m,这些区域均采用超载预压排水固结及强夯处理的方法。超压荷载：1 号泥塘 75kPa，2 号泥塘 90kPa(超载面起始标高为 5.0m)。卸载后再采用强夯处理。

根据设计要求水平排水体为砂垫层。竖向排水体为塑料排水板，1 号泥塘砂垫层顶面标高为 2.0m。(高于 1.0m 标高以上的淤泥挖除保证砂垫层厚度大于 1.0m)，2 号泥塘砂垫层厚度为 1.0m。1 号泥塘根据淤泥及淤泥质土的厚度分为 A 区、B 区两个区。 A 区塑料排水板的间距为 1.2m,B 区为 1.5m，2 号泥塘为 1.2m，均为等边三角形布置。

堆载分层进行，每层堆填的厚度不大于 1.0m，由于两个泥塘的边界条件不同，因此加载的控制标准不相同，1 号泥塘由于泥塘边界高于砂垫层顶面 3.0m，相当已形成一反压护道，除按分层堆填外可不再考虑加载的控制标准，由于 2 号泥塘砂垫层顶面标高与地面基本相同，因此除分层堆填外，加载的控制标准为：深层水平位移量＜4mm/d,地表日沉降量＜15mm/d。

按设计计算，两个泥塘加载完成后经 180 天预压，地基的平均固结度可达 90%以上，实际上 1 号泥塘加载时间与设计计算较接近，2 号泥塘加载时间接近 300 天。两个泥塘卸载标准为：实测地基平均固结度达到 90%,地面沉降速率＜10mm/10d。

两个泥塘地基处理的监测由天津海陆岩土工程有限公司负责,监测的项目主要有：地表沉降观测、深层沉降观测、孔隙水压力观测、深层侧向位移、地下水位观测、十字板抗剪强度试验及土工试验等。两个泥塘典型的荷载—时间—沉降曲线见图 3 及图 4，典型的

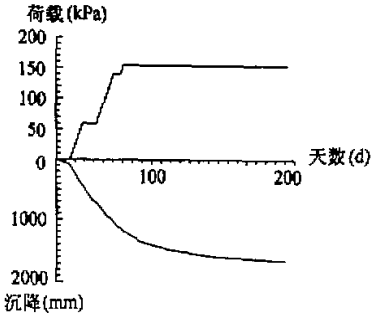


图3　1号泥塘荷载-时间-沉降曲线

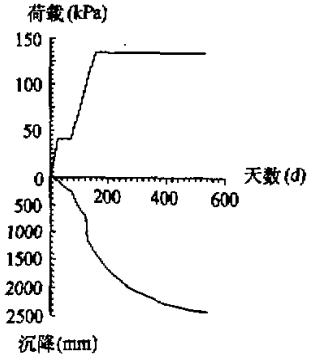


图4　2号泥塘荷载-时间-沉降曲线

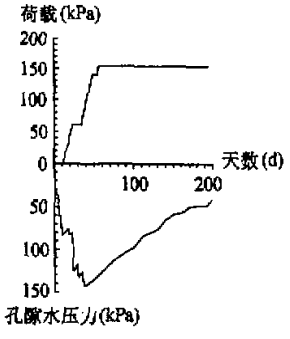


图5　1号泥塘荷载-时间-孔降水压力曲线

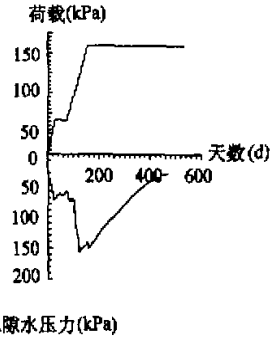


图6　2号泥塘荷载-时间-孔降水压力曲线

荷载—时间—孔隙水压力曲线见图 5 及图 6。根据监测结果，采用指数曲线配合法，从实测沉降曲线(地表及分层)推算出土体最终沉降量、固结度及残余沉降量，并根据孔隙水压力观测资料也进行了土体的固结度的计算。在预压荷载的作用下，卸载时固结度 1 号泥塘大于 90%；2 号泥塘大于 95%。土体的物理力学性质有明显改善和提高，预压前后淤泥类土的土性指标对比情况见表 2。

3. 泥塘边缘区的地基处理

如前所述，两个泥塘是在回填挤淤的过程中形成的，因此在泥塘边缘填土层的下部常存在一个楔形断面的淤泥带，因此必须进行处理，以使各个区域的地基变形能够协调。由于各泥塘边缘及同一泥塘边缘各区段的回填料、淤泥带的形状、厚度及顶面的标高不尽相同，因此地基处理方法也不相同。泥塘边缘的地基处理方法如下：

表 2　预压前后土壤主要物理力学指标一览表

	指标	含水量 ω (%)	容重 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	快剪		固结快剪		压缩系数 $a_{1\text{-}2}$ (MPa⁻¹)	无侧限 q_u (kPa)
								C (kPa)	Φ 度	C (kPa)	Φ 度		
1 号泥塘	加固前	淤泥	59.3	16.3	1.67	44.5	23.4	1.68	7	0	13.5	12	1.66	9.6
		淤泥质亚粘土	41.8	17.7	1.18	34.0	15.7	1.51	11	0.5	17	13	1.20	19.5
	加固后	亚粘土	33.8	18.5	0.96	36.5	15.8	0.83	29	4.6	39	9	0.63	94.1
2 号泥塘	加固前	淤泥	59.3	16.3	1.67	44.5	23.4	1.68	7	0	13.5	12	1.66	9.6
	加固后	淤泥质亚粘土	38.5	17.9	1.05	38.6	13.9	1	21	5	25	13	0.79	54.2

注：1 号泥塘的淤泥及淤泥质亚粘土加固后为亚粘土，2 号泥塘的淤泥加固后为淤泥质亚粘土。

(1)首先在泥塘边缘进行地质雷达及钻探等探测工作，根据探测结果界定区域、区段的界限，决定地基处理的方法。

①1 号泥塘边缘回填料为块石，楔形断面淤泥带的宽度较窄，淤泥带顶面标高较高，淤泥厚度相对较薄，此部分地基处理采用强夯置换方法进行处理。处理宽度 10～20m，强夯置换施工在 2.0m 的标高上进行（挖去 3.0m 厚的回填料），强夯置换的单击夯击能为 5000kJ,夯点间距为 3m，梅花形布置，击数 21～24 击,夯锤直径 1.4m，夯击顺序要求从泥塘外侧向泥塘内侧进行，要求最后两击夯沉量小于 1/10 锤高（15cm）。强夯置换后采用地质雷达和荷载试验进行检验，检验结果表明，地基土承载力提高，淤泥厚度明显减薄。

②2 号泥塘边缘回填料为含碎石的山皮土，楔形断面淤泥带的宽度较宽，淤泥带顶面标高较低，淤泥厚度较厚，此部分地基处理采用堆载预压方法进行处理，塑料排水板采用震动式插板机插设，超压荷载及砂垫层厚度与泥塘相同。

③ 对于 1 号泥塘边缘强夯置换后剩余的楔形断面淤泥带，采用斜插排水板堆载预压处理，排水板间距为 1×1 m，插板与地面成 30° 夹角，预压方法与泥塘相同，2 号泥塘边缘南侧情况与 1 号泥塘边缘相似，处理方法与 1 号泥塘边缘相同。

三　效果及评价

虽然本工程的地基情况和边界条件较为复杂，但由于地基处理设计合理，监测手段有效，施工质量好，达到了预期的效果。本工程地基处理于 1999 年 11 月全部竣工，到 2000 年 4 月上旬，除 2 号泥塘及附近区域尚未投入使用外，其他大部分区域已投入使用一年多，使用情况较好。根据业主一年多的沉降跟踪观测，陆域部分沉降仅为几个毫米，泥塘部分沉降最大为 21 毫米，泥塘边缘部分沉降最大为 15 毫米。