

大面积吹填砂软弱地基条件下桩基选型研究

杨发峻 偶少龙 吴政

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072

[摘要] 在不同桩长、不同桩径以及不同地质区域条件下, 开展锤击沉管夯扩桩和引孔锤击沉管混凝土灌注桩成桩试验, 通过桩基高应变和低应变试验进行了桩基承载力试验研究, 同时对桩基完整性进行分析, 并综合考虑施工难度、成桩效率等因素, 确定了孟加拉达舍尔甘地污水处理厂桩基类型和施工方案。

[关键词] 灌注桩; 地基处理; 桩基承载力; 桩基完整性

DOI: 10.33142/aem.v3i9.4932

中图分类号: TU441+8

文献标识码: A

Study on Pile Foundation Selection under the Condition of Large Area Hydraulic Fill Sand Soft Foundation

YANG Fajun, OU Shaolong, WU Zheng

PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan, 610072, China

Abstract: Under the conditions of different pile lengths, different pile diameters and different geological areas, the pile forming tests of rammed expanded pile and pilot hole hammered concrete cast-in-place pile are carried out. Through the high strain and low strain tests of pile foundation, the bearing capacity of pile foundation is studied. At the same time, the integrity of pile foundation is analyzed, and the factors such as construction difficulty and pile forming efficiency are comprehensively considered, and the pile foundation type and construction scheme of Dashir Gandhi sewage treatment plant in Bangladesh are determined.

Keywords: cast in place pile; foundation treatment; bearing capacity of pile foundation; pile foundation integrity

引言

孟加拉达舍尔甘地污水处理厂位于孟加拉达卡市东郊 Dasherbandi 村, Gojaria 河的东侧, 厂址纬度坐标为 $22^{\circ} 00' 00''$ 、经度 $90^{\circ} 18' 23''$, 场地原地面高程约为 2.5m。经过吹填砂后的地面高程为 6.626~8.953m, 该污水处理厂是在大面积软弱地基上吹填砂加高后修筑各种构筑物。上部结构物的全部荷载由桩基承担, 厂区共设计 10053 根桩基。

1 水文和地质概况

厂区地下水类型主要为孔隙潜水。孔隙潜水赋存于 2-1、2-3 和 2-5 层砂土中, 孔隙潜水初见水位埋深 4.3~14.90m, 稳定水位埋深 4.5~6.5m, 具弱承压性。地下水水位受潮湿影响, 日变化幅度 1~2m, 季节降水影响较大。地下水主要受大气降水和地表水的入渗补给, 排泄方式以蒸发、地下径流为主。承压水赋存于 4-1 层砂土中, 主要受大气降水以及上层潜水入渗补给, 排泄方式以地下径流为主。厂区覆盖层物质成因主要为河流冲积物 (Qa1), 物质成分主要为流塑~软塑粘土、粘土夹细砂层、硬塑粘土和密实的细砂层等。地下水位高程约 -1.5m~3.5m。场区 100 年一遇洪水位为 +7.8m, 50 年一遇洪水位为 +7.47m, 多年平均洪水位为 5.94m。

2 基承载力试验

2.1 试验安排

共布置 10 根试验桩, 桩身混凝土强度等级为 C30, 试验桩设计及施工参数见表 1。

2.2 试验目的

通过单桩竖向抗压静载试验、高应变检测, 确定在自然状态下, 挤土夯扩桩和引孔锤击沉管混凝土灌注桩的单桩竖向抗压极限承载力和单桩竖向抗压承载力特征值。通过基桩低应变检测, 对该工程 10 根试验桩桩身完整性进行评价。研究内夯桩和引孔沉管混凝土灌注桩在复杂多变地基条件下的适应性, 为大规模桩基施工作业选择经济合理的桩基类型。

2.3 试验内容

采用堆载法对 10 根试验桩进行单桩竖向抗压静载试验, 最大加载值为 2660kN~3680kN, 或达到破坏荷载。对 10 根试验桩分别进行高应变检测和低应变检测。

表 1 试验桩设计参数

桩编号	坐标		设计桩顶标高 (m)	桩长 (m)	桩身混凝土浇筑日期	设计桩径 (m)	扩底	桩端持力层	设计单桩竖向承载力特征值 (kN)	单桩竖向荷载最大加载值 (kN)	单桩水平静载最大加载值 (kN)	水平位移允许值 (mm)
	N	E										
T1-S1	2632998.258	852918.864	5.35	27	2018-04-24	0.45	有	3-1	1019.55	2660	/	/
T1-S2	2632976.605	852923.240	5.35	22	2018-04-24	0.45	有	2-2	1019.55	2660	56	10
T1-S3	2632966.867	852928.443	5.35	22	2018-04-25	0.45	无	2-2	1019.55	2660	/	/
T2-S1	2632940.820	853154.717	5.35	27	2018-04-27	0.45	有	3-1	1069.60	2800	/	/
T2-S2	2632946.098	853131.731	5.35	22	2018-04-27	0.50	有	2-2	1069.60	3640	/	/
T2-S3	2632945.576	853120.697	5.35	22	2018-04-28	0.50	无	2-2	1069.60	3210	/	/
T2-S4	2632943.360	853142.903	5.35	27	2018-04-28	0.45	无	3-1	1069.60	2800	/	/
T3-S1	2632785.375	853187.942	5.35	29	2018-04-27	0.50	有	3-1	1082.06	3680	/	/
T3-S2	2632764.446	853186.431	5.35	24	2018-04-30	0.50	有	2-1	1082.06	2820	/	/
T3-S3	2632773.054	853187.099	5.35	29	2018-04-28	0.50	无	3-1	1082.06	3250	90	10

注：无扩底的为引孔锤击沉管混凝土灌注桩，有扩底的为锤击沉管混凝土内夯桩。

2.4 试验区域划分和地质横断面图

根据地质情况对试验区域划分三个区域，其布置示意图见图 1。其中 T3 区域最为薄弱。



图 1 厂区平面图及桩基试验区域划分图

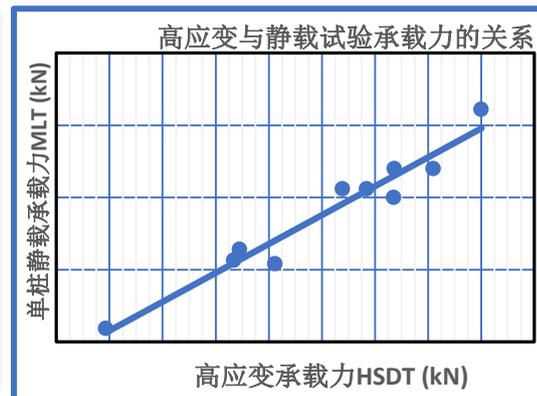


图 2 高应变与静载试验结果

2.5 桩基施工设备

桩基施工设备最大高度 38m，重量 98T。采用 DD40 柴油汽锤，汽锤试桩缸体重量为 4t，总重 7.3t。首次落差在 4m 左右。平均锤击高度在 1.5-3.0m 左右，一次锤击最大能量为 120kJ，夯锤重量满足 JGJ94-2008 规范要，该锤重理论上可满足单桩承载力在 400t 左右的地基处理能力要求。桩基施工设备可在全厂范围内缓慢行走。

2.6 试验方法

2.6.1 单桩竖向抗压静载试验

(1) 试验方法：A) 加荷分级：试验桩每级加荷，为特征值两倍荷载的 1/10，第一级按 2 倍分级荷载加荷。B) 沉降观测：每级荷载施加后，分别按第 5min、15min、30min、45min、60min 测读桩顶沉降量，以后每隔 30min 测读一次桩顶沉降量。C) 沉降相对稳定标准：每一小时内的桩顶沉降量不得超过 0.1mm，并连续出现两次（从分级荷载施加后的第 30min 开始，按 1.5h 连续三次每 30min 的沉降观测值计算）。D) 当出现下列情况之一时，可终止加载：①某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 5 倍，且桩顶总沉降量超过 40mm；②某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下的沉降量的 2 倍，且经 24h 尚未达到相对稳定标准；③已达到设计要求的最大加载值且桩顶沉降达到相对稳定标准；④荷载-沉降曲线呈缓变型时，可加载至桩顶总沉降量 60mm~80mm；当桩端阻力尚未充分发挥时，可加载至桩顶累计沉降量超过 80mm。E) 卸荷与卸荷沉降观测：每级卸载量宜取加载时分级荷载的 2 倍，应逐级

等量卸载。卸载时，每级荷载应维持 1h，分别按第 15min、30min、60min 测读桩顶沉降量后，即可卸下一级荷载；卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间不得少于 3h，测读时间应分别为第 15min、30min，以后每隔 30min 测读一次桩顶残余沉降量。

(2) 试验设备及仪表：堆载反力平台、钢梁、千斤顶、基准梁和百分表等。以堆载反力平台做反力，用 400t 液压千斤顶加载，用百分表测读沉降量。千斤顶、百分表和压力表均已通过标定校正。

2.6.2 高应变检测

(1) 现场测试：首先检查电源、仪器及其他设备是否正常，再根据场地桩情况选择仪器的工作参数，如采样时间、滤波频率、增益，进行激振方式和激振能量参数等激振条件的试验，获得满足检测目的所需要的激振条件。所检测的工程桩应制作桩头，检测时桩头混凝土强度应在 C30 以上，在桩顶下一定深度处安装应变传感器和加速度传感器。

(2) 仪器设备：检测仪器为北京市康科瑞工程检测技术有限公司 KON-PIT (N) 型动测仪。

2.6.3 低应变检测

(1) 现场测试：在测试前，应对桩顶进行处理，凿去浮浆，平整桩顶。在现场进行激振和接收条件的选择试验，并根据场地及基桩情况选择仪器的工作参数，如采样时间、滤波方式、频率、放大增益等。

(2) 仪器设备：北京市康科瑞工程检测技术有限公司 KON-PIT (N) 型动测仪。

3 试验结果及分析

3.1 单桩竖向抗压静载试验结果分析

单桩竖向抗压静载试验结果汇总表 2，桩基承载力根据地质情况分为三个区，T1 区的试验表明，无论是沉管内夯桩还是引孔锤击沉管混凝土灌注桩，当桩径为 0.45m、桩长分别为 22m 和 27m 条件下均满足单桩竖向承载力和允许沉降变形的要求。2-2 层和 3-1 层均可作为持力层。对比 T1-S2 和 T2-S3，两者桩长、桩径和持力层一致，其承载力特征值也完全相同。前者的沉降值略小，在施工可操作性和施工效率上后者好于前者。

T2 区与 T1 区类似，无论是沉管内夯桩还是引孔锤击沉管混凝土灌注桩，当桩径分别为 0.45m 和 0.50m 以及桩长在 22m 和 27m 的条件下均满足单桩竖向承载力和允许沉降变形的要求。桩径越大其承载力越高，2-2 层和 3-1 层均可作为持力层。在桩径和桩长为 27m 时，引孔锤击沉管混凝土灌注桩的单桩承载力等于沉管内夯桩的承载力，而沉降变形小于沉管内夯桩的沉降变形；桩长为 22m 时，引孔锤击沉管混凝土灌注桩的单桩承载力比沉管内夯桩高 50%，而沉降变形小于沉管内夯桩的沉降变形。说明在当地特殊的地质条件下，引孔锤击沉管混凝土灌注桩优于沉管内夯桩。见表 2：

表 2 单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

桩编号	桩长 (m)	设计桩径 (m)	桩端持力层	设计单桩竖向承载力特征值 (kN)	最大加载 (kN)	桩顶总沉降 (mm)	单桩竖向极限承载力 (kN)	单桩竖向承载力特征值 (kN)	极限承载力所对应的桩顶位移量 (mm)	桩基类型	合格判别
T1-S1	27	0.45	3-1	1019.55	2560	40.00	2240	1120	17.36	沉管内夯桩	合格
T1-S2	22	0.45	2-2	1019.55	2660	4.40	2660	1330	4.40	沉管内夯桩	合格
T1-S3	22	0.45	2-2	1019.55	2660	19.25	2660	1330	19.25	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格
T2-S1	27	0.45	3-1	1069.60	2800	11.14	2800	1400	11.14	沉管内夯桩	合格
T2-S2	22	0.50	2-2	1069.60	2548	60.00	2140	1070	20.11	沉管内夯桩	合格
T2-S3	22	0.50	2-2	1069.60	3210	3.00	3210	1605	3.00	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格
T2-S4	27	0.45	3-1	1069.60	2800	7.95	2800	1400	7.95	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格
T3-S1	29	0.50	3-1	1082.06	2576	65.00	2165	1082.5	23.58	沉管内夯桩	合格
T3-S2	24	0.50	2-1	1082.06	1974	85.00	1692	846	18.77	沉管内夯桩	不合格
T3-S3	29	0.50	3-1	1082.06	2925	50.93	2600	1300	18.86	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格

注：根据孟加拉标准，桩基合格的判定条件是在 2 倍设计承载力特征值所对应的桩基沉降在 25mm 以下。

T3 区下卧层有较厚的高液限粘性土, 该区地质条件弱于 T1 和 T2 区, 因而均采用 0.5m 直径的桩进行试验。当桩深为 24m 时, 其桩基承载力不能满足要求。当桩深为 29m 时, 两种桩型均满足单桩承载力的要求, 但引孔锤击沉管混凝土灌注桩的承载力高于沉管内夯桩 20%, 说明前者具有明显的性能优势。

锤击沉管内夯桩其桩基承载力小于引孔锤击沉管混凝土灌注桩的原因, 是当地的地下水位较高、地基土为高饱和土, 其饱和指数一般在 90% 以上, 地层中孔隙水压力较大, 在反复内夯振动作用下, 桩尖土过分扰动、桩尖土变软、地基土的空隙水压力增大, 甚至出现沉管上拔困难、管底涌泥的现象。在该种地质条件下不宜采用锤击沉管内夯桩, 而引孔锤击沉管混凝土灌注桩不再对桩尖进行填料振动, 减小了对地基土的扰动, 其桩基承载力高于内夯桩。

锤击沉管内夯桩是基于贯入度进行施工质量控制, 但该指标不易掌控, 可操作性不佳。

3.2 高应变检测结果分析

对锤击沉管内夯桩和引孔锤击沉管混凝土灌注桩共开展了 10 根高应变竖向承载力试验检测, 其结果见表 3。

表 3 高应变检测结果表

桩号	桩长(m)	桩径(m)	桩尖扩底	设计单桩竖向抗压承载力特征值(kN)	高应变单桩竖向抗压极限承载力(kN)	静载单桩竖向极限承载力(kN)	桩基类型	合格判别
T1-S1	27	0.45	有	1019.55	2391	2240	沉管内夯桩	合格
T1-S2	22	0.45	有	1019.55	2870	2660	沉管内夯桩	合格
T1-S3	22	0.45	无	1019.55	2779	2660	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格
T2-S1	27	0.45	有	1069.60	2974	2800	沉管内夯桩	合格
T2-S2	22	0.50	有	1069.60	2524	2140	沉管内夯桩	合格
T2-S3	22	0.50	无	1069.60	3301	3210	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格
T2-S4	27	0.45	无	1069.60	3120	2800	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格
T3-S1	29	0.50	有	1082.06	2369	2165	沉管内夯桩	合格
T3-S2	24	0.50	有	1082.06	1887	1692	沉管内夯桩	不合格
T3-S3	29	0.50	无	1082.06	2971	2600	引孔锤击沉管混凝土灌注桩	合格

表 3 表明, 高应变单桩竖向抗压极限承载力略高于静载单桩竖向极限承载力。所揭示的结论与上节分析完全相同。

3.3 高应变与桩基承载力关系研究

根据单桩高应变极限承载力和单桩静载极限承载力的试验结果, 可建立两者的相关关系式如下:

$$MLT=0.9995HSDT-220.5 \quad (1)$$

其中, HSDT 为高应变桩基极限承载力, MLT 为静载单桩极限承载力。两者的相关系数为 0.972。进一步分析表明, 式(1)预测值的绝对误差比实际值平均偏大 12%, 而相当误差的偏差为零。高应变在 20 分钟左右可完成一个桩基的检测, 而常规的静载试验需要 2-3 天(包括试验准备)才能完成。高应变可进行大规模桩基质量检查, 而常规的静载试验只能进行小规模试验。根据式(1)的试验结果可预测静载单桩极限承载力。采用高应变进行桩基承载力检测, 可加大桩基承载力检测数量和加快工程检测的速度。

3.4 高应变极限承载力与侧阻力关系研究

对应引孔沉管混凝土灌注桩其高应变侧阻力和极限承载力检测结果见表 4。该表表明, 高应变单桩竖向抗压极限承载力等于桩基的总阻力。

表 4 高应变侧阻力和极限承载力检测结果表

桩号	桩长(m)	桩径(m)	桩尖扩底	高应变单桩竖向抗压极限承载力(kN)	侧阻力(kN)	端阻力(kN)	总阻力(kN)
T1-S3	22	0.45	无	2779	1786	993	2779
T2-S3	22	0.50	无	3301	2303	998	3301
T2-S4	27	0.45	无	3120	2264	856	3120
T3-S3	29	0.50	无	2971	1981	990	2971

根据表 4 的结果, 发现其侧阻力与其高应变竖向抗压极限承载力存在较好的线性关系, 其结果如下:

$$Y=1.0616x-1146.7 \quad (2)$$

式中 Y 为侧阻力(kN), x 为大应变试验得到的竖向极限承载力(kN)。式(2)的回归系数为 0.962。侧阻力与大应变单桩竖向承载力关系见图 4。由大应变单桩极限承载力可直接计算得到侧阻力, 再由极限承载力减去侧阻力就可得端阻力。用式(2)的结果计算表 1-4 的侧阻力, 发现其相对误差在 5%以内见图 3。

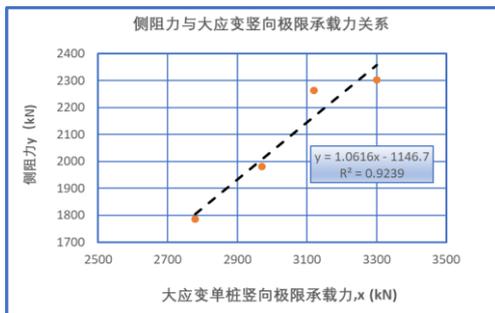


图 3 侧阻力与大应变单桩竖向承载力关系图

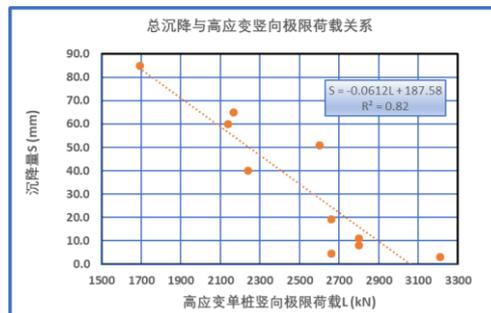


图 4 最大沉降与高应变竖向承载力关系图

3.5 高应变极限承载力与沉降关系研究

结合上述结果进行相关分析, 可建立高应变极限承载力和总沉降的关系式如下:

$$S=-0.0612L+187.58 \quad (3)$$

式中 S 为总沉降量(mm), L 为高应变极限承载力试验结果。式(3)的回归系数为 0.906。最大沉降与高应变竖向承载力关系见图 4。

当用高应变确定桩基极限承载力时, 可采用上式测算桩基总沉降值。

3.6 低应变检测结果分析

低应变检测结果见表 5。

表 5 低应变检测结果表

桩号	设计桩身直径 (mm)	桩长 (m)	波速 (m/s)	桩身结构完整性描述	桩身质量评价	桩基类型
T1-S1	0.45	27	3750	桩身基本完整	II 类桩	沉管内夯桩
T1-S2	0.45	22	3850	桩身完整	I 类桩	沉管内夯桩
T1-S3	0.45	22	3750	桩身完整	I 类桩	引孔锤击沉管混凝土灌注桩
T2-S1	0.45	27	3700	桩身完整	I 类桩	沉管内夯桩
T2-S2	0.50	22	3800	桩身基本完整	II 类桩	沉管内夯桩
T2-S3	0.50	22	3800	桩身完整	I 类桩	引孔锤击沉管混凝土灌注桩
T2-S4	0.45	27	3800	桩身完整	I 类桩	引孔锤击沉管混凝土灌注桩
T3-S1	0.50	29	3750	桩身完整	I 类桩	沉管内夯桩
T3-S2	0.50	24	3800	桩身基本完整	II 类桩	沉管内夯桩
T3-S3	0.50	29	3750	桩身基本完整	II 类桩	引孔锤击沉管混凝土灌注桩

表 5 表明, 用低应变法所测 10 根试验桩, 其中 4 根试验桩评为 II 类桩, 其余 6 根试验桩波形变化比较规则, 振幅衰减正常, 无明显的桩身中间阻抗变化界面反射波, 桩底反射较清晰, 桩身混凝土纵波速度 3700~3850m/s, 说明桩身完整, 评为 I 类桩。

4 结论

- (1) 从施工可操作性和施工效率方面考虑, 引孔锤击沉管灌注桩优于锤击沉管内夯桩;
- (2) 在饱和地基土的条件下, 引孔锤击沉管混凝土灌注桩的单桩承载力等于或大于沉管内夯桩的承载力, 沉降变

形小于沉管内夯桩,引孔锤击沉管混凝土灌注桩的技术性能优于沉管内夯桩;

(3)当地下水位较高或地基土为高饱和土,地层中孔隙水压力较大时,在反复内夯振动作用下,桩尖土过分扰动、其桩尖土变软、地基土的空隙水压力增大,甚至会出现沉管上拔困难、管底涌泥现象。在该类地基土层中不宜采用锤击沉管内夯桩,而引孔锤击沉管混凝土灌注桩减小了对地基土的扰动,故其桩基承载力优于沉管内夯桩;

(4)锤击沉管内夯桩是基于贯入度控制施工质量,但该指标不易掌控,施工可操作性不及引孔锤击沉管混凝土灌注桩;

(5)对于大规模桩基施工,可通过试验建立高应变极限承载力和单桩静载极限承载力以及高应变极限承载力和单桩静载沉降的相关关系,并用于桩基施工质量快速检测;

(6)侧阻力与其高应变竖向抗压极限承载力之间存在较好的线性关系。通过高应变试验可确定桩基侧阻力和桩端阻力的大小;

(7)对比两种桩型桩基承载力的试验结果,发现引孔锤击沉管混凝土灌注桩是适合孟加拉达舍尔甘地污水处理厂当地复杂地质条件的桩基类型。

[参考文献]

- [1]吴政,张成波,鞠其凤,等.引孔锤击沉管混凝土灌注桩施工工艺研究与应用[J].水利水电技术,2020,51(1):85-91.
- [2]吴政,鞠其凤,张成波,等.低洼沼泽地区大面积水力吹填施工工艺研究与应用[J].水利水电技术,2020,51(1):80-84.
- [3]鞠其凤,张成波,吴政,等.吹填与桩基施工前后的土层物理力学指标分析[J].四川水力发电,2021(12):66-70.
- [4]杨涛,张佳.孔锤击沉管混凝土灌注桩在孟加拉吹填场地建筑基础中的应用[J].四川水力发电,2021(12):55-59.
- [5]杨发峻,张成波,周全胜,等.南亚最大污水处理厂项目建设管理创新实践[J].中国电力管理创新实践(2020年)论文集,2021(10):592-594.

作者简介:杨发峻(1985-)男,四川成都人,经济师,硕士,项目经理助理,从事国外工程项目管理和市场营销工作;偶少龙(1997-)男,安徽合肥人,硕士,助理工程师,从事项目管理工作;吴政(1963-)男,四川成都人,正高级工程师,本科,项目总工,从事国外工程技术和项目管理工作。