

劲性复合桩在水利工程中的应用与研究

徐建军^{1,4}, 王洪玉^{2,4}, 朱振宇^{1,4}, 杭 丹^{3,4}

(1. 江苏省太湖地区水利工程项目管理处, 江苏 苏州 215218; 2. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210029;
3. 江苏省防汛防旱抢险中心, 江苏 南京 211500; 4. 江苏省新孟河枢纽工程建管局, 江苏 常州 213022)

摘要:在软基中先施打半刚性水泥土类桩(M 桩), 水泥未硬凝时再施打劲性桩, 形成劲性复合桩(MC 桩)。对水利工程中劲性复合桩设计方法进行探讨, 并对地基有防渗要求的情况, 采用水泥土作为褥垫层进行现场观测, 试验结果将对劲性复合桩在水利工程中的应用和推广提供了参考。

关键词:劲性复合桩; 水利工程; 水平承载力; 复合地基

中图分类号:TU47 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2021)08-0015-04

Application and research of rigid composite pile in hydraulic engineering

XU Jianjun¹, WANG Hongyu^{2,4}, ZHU Zhenyu^{1,4}, HANG Dan^{3,4}

(1. Taihu Lake Region Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suzhou 215128, China;
2. Water Conservancy Project Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
3. Jiangsu Flood Prevention and Drought Relief Rescue Center, Nanjing 211500, China;
4. XinMeng River Junction Project Construction Management Bureau of Jiangsu Province, Changzhou 213022, China)

Abstract: The semi-rigid cement soil pile (M pile) was first driven in soft foundation, and then the stiff pile was driven when the cement was not hardened to form the rigid composite pile (MC pile). The design method of rigid composite pile in hydraulic engineering was discussed, and when the foundation had anti-seepage requirement, the soil-cement was used as cushion to carry on the field observation, the test results would provide reference for the application and popularization of rigid composite pile in hydraulic engineering.

Key words: rigid composite pile; hydraulic engineering; horizontal bearing capacity; composite foundation

近年来,劲性复合桩作为一种适合特殊地基的地基处理技术,被广泛应用于工业与民用建筑和交通领域加固软弱地基,这种新方法在南水北调东线一期工程泗阳站水利工程建设中也得到了应用。劲性复合桩先施打半刚性水泥土类桩(M 桩),水泥未硬凝时再施打劲性桩,形成劲性复合桩(MC 桩),

共同承担上部结构荷载^[1-3]。劲性复合桩通过褥垫层与基础连接,褥垫层是构成劲性复合桩复合地基的重要组成部分^[4]。我国住房和城乡建设部颁布的《劲性复合桩技术规程》(JGJT327—2014)中,仅有竖向承载力的计算方法,缺少劲性复合桩水平承载力方面的计算内容,水利工程中翼墙、闸室墙等

收稿日期:2021-03-10

基金项目:江苏省水利科技项目(2017017)

作者简介:徐建军(1969—),男,工程师,主要从事工程管理工作。E-mail:402250684@qq.com

承受水平力的部位需要进行抗滑验算,同时挡水水工建筑物地基基础有防渗要求,不宜采用《建筑地基处理技术规范》和《劲性复合桩技术规程》中规定的砂石材料褥垫层^[5-6]。为此,本文对水利工程中劲性桩设计方法进行探讨,并对地基有防渗要求的情况,采用水泥土作为褥垫层进行现场观测研究,本文的探讨和现场试验结果,将对劲性复合桩在水利工程中的应用和推广提供参考。

1 地基处理设计

1.1 单桩与复合地基承载力计算

劲性复合桩单桩竖向承载力可按《劲性复合桩技术规程》(JGJT327—2014)中桩侧破坏面位于内、外芯界面破坏和位于外芯和桩周土的界面两种情况分别计算,然后取二者小值,但此规范验算时未校核桩身强度,设计中可按文献[7-8]中 CFG 复核桩顶强度确定的承载力:

$$Ra = \psi_c f_{ck} A_c + \eta f_{cu} A_p \quad (1)$$

式中: f_{ck} 为芯桩混凝土轴心抗压强度,取混凝土强度等级的一半或混凝土轴心抗压强度设计值(kPa); f_{cu} 为与外芯桩身水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7 mm 的立方体,也可采用边长为 50 mm 的立方体)在标准养护条件下 90 d 龄期的立方体抗压强度平均值(kPa); A_c 为劲性复合桩内芯桩身截面面积(m^2); A_p 为劲性复合桩外芯水泥土截面面积(m^2); ψ_c 为芯桩工作条件系数,预制芯桩取 0.9,灌注芯桩取 0.8; η 为桩身强度折减系数,干法可取 0.20 ~ 0.30;湿法可取 0.25 ~ 0.33。

劲性桩复合地基承载力及沉降计算可依据规范进行计算。

1.2 水平承载力计算

水利工程中劲性复合桩和地基土联合作用,以复合地基的形式共同承担上部荷载。现行《劲性复合桩技术规程》(JGJ/T327—2014)单桩水平承载力规定以现场试验确定^[6],设计时复合地基的抗滑等效强度参考广东省海堤工程设计导则中搅拌桩复合体的强度参数计算公式进行计算:

$$C_c = C_s(1 - m) + C_p \times m \quad (2)$$

$$\tan(\Phi_c) = (1 - m)\tan(\Phi_s) + m\tan(\Phi_p) \quad (3)$$

式中: C_c 、 Φ_c 分别为复合地基黏聚力(kPa)、内摩擦角($^\circ$); C_s 、 Φ_s 分别为桩间土黏聚力(kPa)、内摩擦角($^\circ$); C_p 、 Φ_p 分别为桩体黏聚力(kPa)、内摩擦角($^\circ$)。

计算出复合地基等效强度参数后,依据相关规范计算地基土的综合摩擦角计算其稳定性。

1.3 褥垫层设计

工程设计上褥垫层设计主要参照规范,凭经验进行设计。依据文献[6],桩顶和基础之间应设置褥垫层,褥垫层材料宜用中砂、粗砂或级配砂石,碎石最大粒径不宜大于 30 mm,厚度宜取 150 ~ 300 mm。然而,大部分水利工程挡水建筑物对地基基础有防渗要求,不宜采用该规范中规定的砂石材料褥垫层,为此依据以往水利行业设计经验,可采用 20 ~ 30 cm 厚的水泥土作为劲性桩复合地基的垫层。

2 工程实例及加固效果

2.1 工程概况及地质条件

奔牛水利枢纽工程为新孟河延伸拓浚工程干河枢纽工程之一,位于常州市奔牛镇新孟河与京杭运河交汇处,工程的主要任务包括防洪、引排水和通航,枢纽由京杭运河立交地涵、船闸、节制闸和孟九桥组成。

枢纽中船闸闸首、闸室、节制闸以及大部分翼墙、导航墙底板均坐落于②₃层淤泥质重粉质壤土层上,该土层在建筑物底板下厚度约 8 ~ 10 m,局部深度达到 15 m,②₃层土体含水率 41.9%、塑性指数为 17.2,地基土体局部含有腐蚀质,其地基允许承载力为 70 kPa,不能满足建筑物地基承载力的要求,地基土层及其基本性质见表 1。

设计采用劲性复合桩进行地基处理,桩长为 12 m,内芯直径 22 cm、外芯直径 70 cm,经计算单桩承载力特征值为 420 kN,桩间距 1.25 m,复合地基承载力特征值 180 kPa,桩顶设置 20 cm 厚的水泥掺量 8% 的水泥土作为褥垫层。

2.2 试桩

在工程桩施工之前,于工程场地进行试桩试验,检测该桩型的适用性及承载性能。现场试桩检测采用单桩静载荷试验进行,采用由主梁(工字钢)、次梁和配重块搭成的压重平台反力装置,配重块堆积,最大压重量为 1 000 kN。试桩桩头情况和加载装置分别为图 1、图 2 所示。

采用慢速维持荷载法,用电动油泵逐级加载,共分 10 级加载至承载力特征值的 2 倍。卸载采用 5 级卸载,单级卸载量为单级加载量的 2 倍。荷载值通过压力传感器测量传输给测试仪自动记录;工程桩(试桩)沉降则通过对称正向布置于桩头承压板的位移传感器测量,传输给测试仪自动记录。

表 1 地基土层基本物理力学性质指标

层号	土层名称	层厚 h/m	含水率 $W/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	压缩 系数 a_v/MPa^{-1}	压缩 模量 E_s/MPa	容许 承载力 $[\sigma_0]/\text{kPa}$	桩侧土的摩 阻力标准值 q_{ik}/kPa
①	素填土	4.55	26.6	1.86	0.851	12.1	0.38	0.424	4.43		
② ₂	粉土	11.46	29.6	1.90	0.842	9.1	0.81	0.231	8.03	120	
② ₃	淤泥质粉质黏土	16.3	41.9	1.78	1.168	17.2	1.06	0.697	3.16	70	22
③ ₁	黏土	9.81	26.5	1.98	0.751	15.4	0.40	0.266	6.63	180	65
③ ₂	粉质黏土	4	30.5	1.92	0.849	13.3	0.66	0.302	6.13	160	57
③ ₃	粉土	8.78	31.1	1.89	0.873	9.9	0.83	0.243	7.72	150	42
④ ₂	粉质黏土	4.89	33.2	1.89	0.917	12.5	0.98	0.352	5.51	100	37
④ ₃	粉土	15.85	25.0	1.94	0.740	9.3	0.48	0.158	10.99	200	60



图 1 现场试桩桩头情况



图 2 现场试桩加载装置

图 3 为 6 个试桩的荷载 - 沉降曲线。

试桩结果表明该工程所抽测的劲性复合桩试桩的 $Q-S$ 曲线均为缓变型, 根据 JGJ106—2014 方法综合分析确定, 该工程试桩抽测的 6 根劲性复合桩的单桩竖向抗压承载力 $Q_u \geq 826 \text{ kN}$, 满足设计承载力要求。

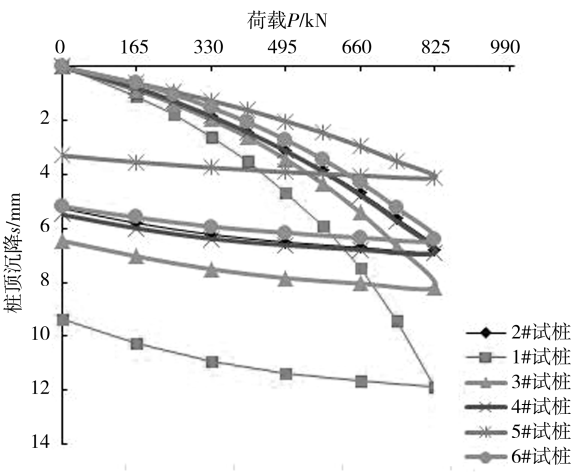


图 3 试桩的荷载 - 沉降曲线

2.3 工程桩监测

为对劲性复合桩加固的质量进行检验, 并为计算理论提供依据和设计参数, 在施工过程中在现场根据不同的地质条件及设计参数布置监测断面和埋设监测仪器, 以对劲性复合桩复合地基在上部荷载作用下桩和桩间土的沉降、桩土应力分担等变化规律进行研究。监测断面仪器布置见图 4。

填筑阶段每上一层土观测 1 次, 或每 3 ~ 5 d 观测 1 次, 填土完成后逐步过渡到每 10 ~ 15 d 观测 1 次, 并根据数据情况随时加密监测。

表面沉降变化规律是对墙后填土施工速度进行动态控制的重要指标, 其值也反映了软土地基处理的效果, 图 5 为其沉降—填土高度—时间关系曲线, 其中 T_a 、 T_d 分别为翼墙左右两侧布置在桩间土

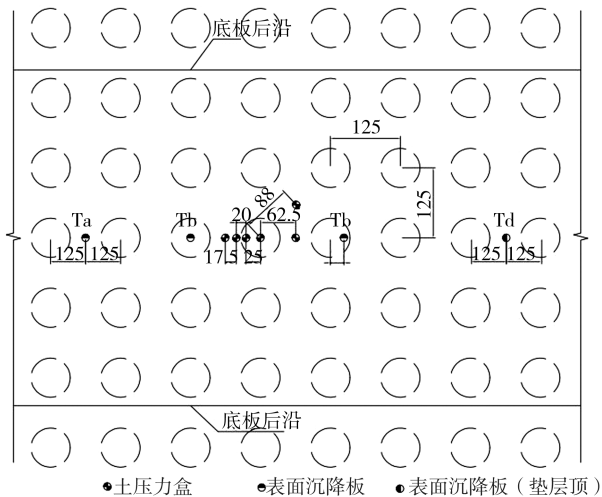


图4 应力计表面沉降设备埋设布置图(单位:cm)

上的沉降板, T_b 为布置在桩顶上的沉降板, T_c 为与 T_b 所在桩的对称位置桩的水泥土上的沉降板。由图可以分析得出以下规律:各断面的表面沉降随着填土高度的增加,沉降量相应增大,沉降过程线存在几个较明显的拐点。

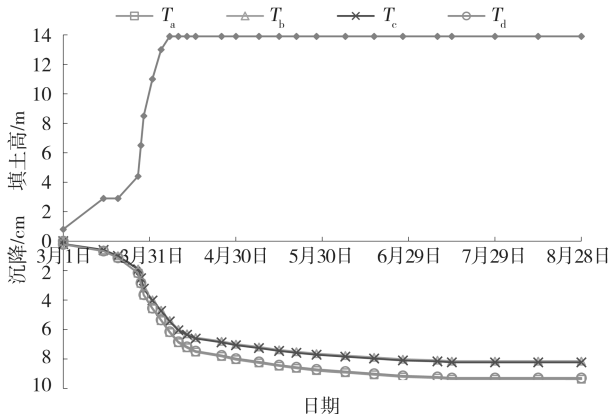


图5 西侧断面填土—表面沉降变化规律

荷载填筑初期桩顶和桩间土的沉降均较小,沉降发生的速率较慢,尤其是桩顶几乎不发生沉降,说明此时荷载主要由桩间土承担;当填筑高度达到 8.5 m 时,桩顶和桩间土沉降速率均有增大的趋势,但桩间土的沉降速率要大于桩顶的沉降速率,上部荷载在桩顶和桩间土上进行着调整。

测得的桩顶和桩间土应力随填土荷载的变化过程线如图 6 所示,各断面变化规律均较相似,可以看出随着荷载的增加桩顶及桩间土的应力均相应提高,但二者的增加规律却有较大的差异。从该断面的桩土沉降差异发展过程线可以看出,在桩土沉降差基本维持稳定的前提下,桩土之间仍会产生一定的应力调整,这主要是底板下水泥土垫层已处于压实状态,而桩顶压力更大导致垫层更为密实,垫层和桩及桩间土结合紧密后,桩土沉降差很小的

发展即会引起桩土应力相对较大的调整。

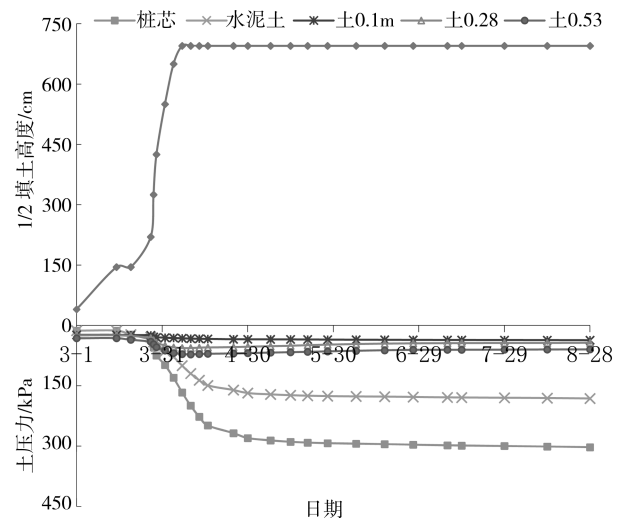


图6 西侧断面填土土压力随时间变化曲线图

3 结 语

劲性水泥土复合桩(MC 桩)综合了水泥土桩及高强度桩芯的优点,实现了造价低廉、单桩承载力高、沉降量小的目的。常规的劲性桩在竖向荷载下显示的是桩基特性,而素混凝土劲性水泥土复合桩显示的是复合地基性状,水泥土桩及桩间土体承担了部分荷载,很好地发挥了水泥土桩及桩间土体的承载能力。

劲性桩复合地基在提高桩周土地基承载力的同时,由于自身内外芯桩的协同作用,更能有效的为支撑上部荷载提供保障,充分体现了其优越性。劲性桩复合地基基础具有性价比高,施工方便,造价低廉等优点,且对周围环境影响小,因而在软弱地基土加固中有着广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] 李俊才,邓亚光,宋桂华,等. 素混凝土劲性水泥土复合桩承载力机理分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 181-185.
- [2] 凌光容,安海玉,谢岱宗,等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92-96.
- [3] 任连伟. 高喷查新组合桩技术及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 30(增刊1): 518-522.
- [4] 钱于军,许志伟,邓亚光,等. 劲性复合桩的工程应用于实验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 998-1001.
- [5] 建筑地基处理技术规范:JGJ792012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.

(下转第 31 页)