

孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩施工技术研究

王迎丰, 曾华健, 潘 忱, 张小莉, 刘雪珠, 伍翔飞

(江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 物流仓储工程对地基承载力及沉降要求较高, 而软土地基场地地质条件复杂, 采用传统地基处理方法难以满足主体结构对地基承载力及沉降的设计要求。为此引入孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩地基处理新技术, 首先阐述了该新技术的加固原理, 即通过孔内强夯碎石桩对上部软土进行处理以提高表层土地基承载力, 通过 CFG 桩对下卧软土夹层进行处理以解决软土地基沉降过大及不均匀沉降问题。随后阐述了该新技术的工艺特点、工艺流程及操作要点。进一步以云南某物流仓储项目地基处理工程为例, 该场地为上覆深厚软填土、下卧高压缩性软土夹层地基, 采用孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩地基处理新技术对该大面积仓储地坪地基进行加固处理, 详细阐述了该新技术的设计及施工工艺参数, 最后对复合地基现场平板载荷试验检测结果及库区地坪工后沉降监测结果进行分析, 结果显示经该新技术处理后地基承载力及沉降均能得到较大改善, 表明该方法具有良好的处理效果。

关键词: 物流仓库; 软土地基; 孔内强夯碎石桩; CFG 桩; 地基处理; 施工技术

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0109-07

Study of construction technique for dynamic compacted gravel pile combined with CFG pile

WANG Ying-feng, ZENG Hua-jian, PAN Chen, ZHANG Xiao-li, LIU Xue-zhu, WU Xiang-fei

(Jiangsu Geotechnical Engineering Co., Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: High requirements are needed for the bearing capacity and settlement of the foundation in logistics warehouse projects. Due to the complex geological conditions of the soft soil foundation, the traditional ground improvement method is unable to meet the design requirements for the bearing capacity and settlement of the foundation. Therefore, a new technology for foundation treatment of in-hole dynamic compaction gravel piles combined with CFG sparse piles is introduced. Firstly, the reinforcement principle of the new technology is expounded. The upper soft soil is treated by the dynamic compaction gravel pile in hole to improve the bearing capacity of surface soil foundation, and the underlying soft soil interlayer is treated with CFG piles to solve the problems of excessive and uneven settlement of soft soil foundations. Then, the construction process of the new technology is presented. Taking the foundation treatment project of a logistics warehouse project in Yunnan as an example, the site is covered with deep soft fill soil and lying on the interlayer foundation of high compressibility soft soil, the new technology of dynamic compaction gravel pile in hole combined with CFG sparse pile foundation treatment is adopted to strengthen the large-area warehouse foundation. The on-site plate load test results of the composite foundation and the monitoring settlement of the floor in the reservoir area are analyzed. The results show that the bearing capacity and settlement of the foundation can be greatly improved after treatment, indicating that the method has good treatment effect.

Key words: logistics warehouse; soft soil foundation; dynamic compaction gravel pile in hole; CFG pile; ground improvement; construction technique

0 引言

大面积物流仓储具有面积广、堆载大及堆载时

间长等特点, 当遇复杂地质条件时, 采用天然地基显然无法满足仓库正常使用功能要求, 故需对地基进行加固处理以满足对地基的承载力及沉降要求。现有地基处理方法包括水泥搅拌桩、高压旋喷桩、

刚性桩、强夯法、换填碾压、真空预压等多种,采用以上方法对地基进行加固后一般均能达到设计使用要求。但基于物流仓储分布的地域性差异,地基处理常面临深厚松散填土、高含水率软土、淤泥质土、泥炭土等复杂软土地基。同时随着科技的发展,智能物流仓储也逐渐增加,其运营过程中的高精叉车、自动分拣机及无人搬运车等也受仓库地坪沉降及不均匀沉降影响较大,对地坪平整度要求也较高。鉴于场地地质条件的复杂性及物流仓储对地坪沉降及平整度的高要求性,此时采用传统地基处理方法难以达到对变形或承载力的设计要求,或不能兼顾到仓库地基处理设计对造价的要求,具有一定的局限性^[1-2]。

基于此,提出孔内强夯碎石桩联合素混凝土桩(CFG疏桩)复合地基处理新技术,阐述孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩处理复杂软土地基的工艺原理、工艺特点,进一步结合某上覆深厚填土,下覆高压缩性软弱夹层场地物流仓储项目地基处理工程,采用孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩对该复杂场地大面积物流仓储地基进行加固处理以解决软土沉降、承载力不足以及不均匀沉降问题,详细阐述孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩在该工程应用中的设计及施工工艺,并分析评价处理效果,相关研究为今后类似复杂大面积地基处理工程提供借鉴^[3-4]。

1 工艺原理及特点

对孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩处理复杂软土地基的施工工艺原理、适用范围、工艺流程及操作要点进行详细阐述。

1.1 工艺加固原理

(1) 孔内强夯碎石桩技术

孔内强夯碎石桩在成桩原理上归属于强夯置换地基处理范畴,强夯置换加固地基的原理是利用强夯法加固高饱和度黏性土或粉土时,在夯坑内不断填入石块、碎石或其它粗颗粒材料,随后将碎石填料强行夯击并挤入周边软土,在软土地基中形成大于夯锤直径的碎石桩,这种碎石桩一方面起到置换作用,使附加荷载向桩体集中,另一方面具有强夯加密作用。在强夯过程中,通过碎石向下的不断贯入,会使得桩底土层受到冲击能的影响而得到加密,同时碎石填料向四周侧向挤出,也会使桩侧土层得到挤密加固。其次,碎石桩因其本身的大直径高孔隙比特性,成桩之后也起到一个大直径竖向排水井的作用,在附加荷载作用下可加快孔隙水压力

的消散而迅速提高土体强度^[5-8]。

孔内强夯碎石桩是一种新型强夯置换改进工艺,其采用长螺旋钻机或旋挖钻机预成孔,成孔桩直径为800~1200mm,桩端进入土层一定深度。孔内回填碎石土、砖渣、混凝土块或风化石等硬质材料,填至孔深2/3或孔口处,随后通过强夯机吊起异型锤(橄榄锤)一定高度,夯击能宜取800~1500kN·m,分次夯击、分次填料,每次3~5击,每次填料1.5~2m³,达到一定击数、或石料基本不下沉、或周边隆起过大时进行收锤。通过对侧向软弱土体进行挤密、对下部土体进行夯实,形成“漏斗状”桩体。结合多遍强夯,桩顶填土后进行满夯一遍,再进行回填土碾压,从而对土体进行有效加固^[4]。

(2) 孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩技术

孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩为通过孔内强夯碎石桩对表层填土、软土等复杂地层进行处理,发挥强夯碎石桩的置换及挤密作用,再加以满夯对表层填土进行夯实,提高表层填土的地基承载力,通过CFG疏桩对下部软土进行处理,桩端穿过软土层进入硬持力层,起到减沉作用,大大减小地坪后期工后沉降。其中强夯碎石桩成桩直径1.4~1.5m,CFG桩桩径400~500mm,CFG桩在碎石桩间按内插布置,随后于桩顶回填级配碎石或铺设一层碎石褥垫层,再经过碾压或补土碾压,达到加固处理目的^[3]。

1.2 工艺特点

(1) 处理效果显著

孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩技术为刚性桩与散体材料桩相结合的复合地基处理方法,充分发挥了碎石桩与CFG疏桩的优势,通过碎石桩提高了地基整体承载力,通过CFG疏桩对地基沉降进行有效控制,地基处理效果显著。

(2) 施工安全

与传统地基处理方法相比,孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩施工工艺简单、施工操作简便、各工序施工技术成熟、危险性因素及不确定情况较少、施工安全易于控制。

(3) 经济环保

相较于传统(半)刚性桩(CFG桩、预制桩)复合地基,本工艺可在保证处理效果的基础上,降低(半)刚性桩的用量,可大幅降低造价成本,同时碎石桩具有填料取材方便、可采用建筑废料替代及成桩过程中震动影响小等优势特点,经济环保效益显著^[9-10]。

1.3 适用范围

孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩适合处理上覆高压缩性软土、填土,下覆软土层等地区的大型物流仓储、工业园等大面积地基处理施工,处理深度可达 20~25 m 左右。

2 施工流程

2.1 工艺流程

孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩复合地基施工工艺流程如图 1 所示。

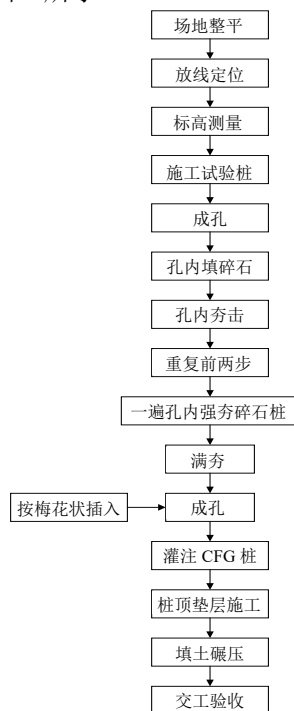


图 1 孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩施工工艺流程图

Fig. 1 Construction process flow chart of dynamic compacted gravel pile and CFG pile

2.2 工艺操作要点

(1) 放线定位

a) 依据所提供的坐标点用全站仪或 GPS 进行工程定位,在场内四周选择可永久保留位置埋设、固定至少 4 个控制点。

b) 在地基四周布设 4 条轴线,打入木桩并钉入小铁钉,地面以上外漏 30~50 cm。

c) 依据施工图纸,在施工现场平面内布设等间距方格网,进行夯点放样,标出第一遍桩点位置。

(2) 夯前标高测量

依据甲方提供的高程控制点用水准仪在地基周边定位可长期保留的 ± 0.00 点,依此在场内做出标高控制点,并对场内天然地基控制点标高进行量测,作为后续施工的依据。

(3) 施工试验桩

大面积孔内强夯碎石桩或 CFG 桩施工之前,需先进行试验桩施工。对于碎石桩,通过试夯得到夯击数、填料量和夯沉量关系曲线,从而最终确定夯击数、收锤标准、夯击面标高和强夯碎石桩夯填石料数量等具体参数。对于 CFG 桩,通过施工试验桩成桩后对桩体进行平板载荷试验,以确定 CFG 桩成桩深度、承载力与沉降关系等参数,以指导后续大面积碎石桩与 CFG 桩施工。

(4) 孔内强夯碎石桩施工

采用长螺旋钻机或旋挖钻机成孔,孔深根据地层一般为 5~10 m,视地基填土层或浅层软土厚度而定,孔内填充碎石料至孔深 2/3 处或孔口处(依据地层地质条件确定),采用橄榄锤(异形锤)按设计击数进行夯击,夯击能量 800~1 500 kN·m。孔内填料选用碎石直径 < 30 cm,含泥量 < 5%,填料分层填入桩孔,分层夯实形成桩体,重复以上步骤,施工下一根桩,分次夯击、分次填料,每次 3~5 击,每次填料 1.5~2 m³。

(5) 满夯

强夯碎石桩施工结束后,进行场地平整,采用平锤进行一遍满夯,夯锤直径 2.2~2.5 m,满夯击数 2 击,夯击能为 1 000~1 500 kN·m,夯锤锤印搭接面积不小于 1/4。

(6) CFG 桩施工

a) 桩身强度 C15~C25,采用长螺旋挖钻孔等机械成孔工艺,灌注成桩。

b) 施工前应按设计要求在室内进行配合比试验,施工时按配合比配置混合料,所选材料均应符合相应标准要求。

c) 成桩过程中,抽样做混合料试块,每台机械每天应做一组(6 块)试块,标准养护,测定其立方体抗压强度。

d) 桩顶灌注高度控制在室外地坪标高下 1.0~1.5 m,上部用级配砂石回填夯实。

e) 挖土和截桩时应注意对桩身及桩间土的保护,严禁造成桩身开裂甚至破坏或扰动桩间土。

f) 施工桩身垂直度偏差不得大于 1%。

g) 施工前应选取 5 根有代表性的桩先进行试桩,确定施工工艺、判定施工可行性及成桩效果。

(7) 桩顶垫层施工

桩顶回填一定厚度的级配碎石垫层,不需要满铺。

(8) 回填碾压

采用 22 t 振动压路机碾压密实,至少 3~5 遍,

最后分层回填碾压至交工面。为保证孔内强夯碎石桩与 CFG 桩共同发挥作用,上部填土应选择山皮土,且填土厚度至少达 500 mm 以上。

3 工程应用

3.1 工程概况

昆明某物流分发中心场地位于昆明市呈贡新城马金铺片区,处于梁峰路与照塘街的交叉口,北面紧靠照塘街,东面紧邻梁峰路,总占地面积 118 900.58 m²。一期工程包含 1 号库房、2 号库房、设备房、维修间、综合楼及门卫,用地面积 63 696.98 m²;二期工程包含 3 号库房、4 号库房及门卫,用地面积 55 203 m²。一期为单层仓库,二期建筑方案未确定,但仓库边界已确定。一二期中间为河道,水位在现有地面以下 3 m,西侧为水厂,北面照塘街过去为正在建设的厂房,其余两侧均为道路或空地,无重要管线。原场地为种植土,并经政府回填平整,回填土质量较差,基本为基坑开挖弃土,非山皮土。

3.2 地质条件

根据场地勘察报告,地层主要是:

- ①填土,为场地整平时回填,成份主要由黏性土夹碎石、角砾及砂土等组成,部分为基坑开挖弃土,结构松散,填埋时间短。
- ②耕土层,力学性质及状态均较差,厚度薄。
- ③黏土层,冲洪积成因,状态较好,力学强度及抗变形能力一般,层顶埋深 0.50~2.50 m,层厚 2.30~5.10 m。
- ④黏土,力学强度及状态均较好,抗变形能力稍好,层顶埋深 9.50~10.50 m,层厚 2.30~5.10 m。
- ④₂泥炭质土层,力学强度及状态均相对较差,

呈薄层或透镜体状,连续性较差,属深埋软弱夹层。

⑤黏土层,力学强度及状态均一般,抗变形能力稍好,层顶埋深 9.50~10.50 m,层厚 2.30~5.10 m。

⑤₁圆砾层,力学强度及状态均较好,抗变形能力稍高,层顶埋深 2.80~5.10 m,平均层厚 4.30 m,场地连续分布。

勘察期间经量测,所有钻孔均观测到稳定地下水,测得钻孔初见水位在 1.60~4.50 m 之间,稳定水位在 2.00~5.50 m 之间。

场地典型地质剖面图及土工物理力学指标见图 2 与表 1。

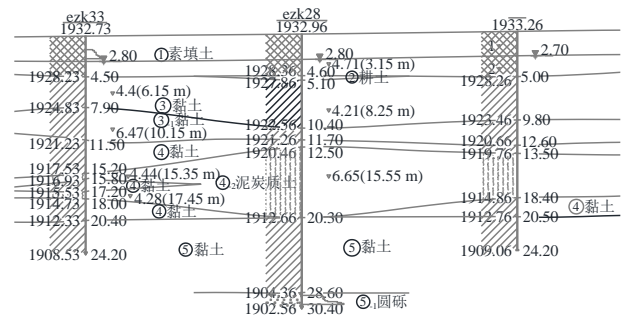


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geology sections

3.3 工程特点

- (1) 场地上部为新近填土层,厚度 5~6 m,且局部为基坑开挖弃土,结构松散,力学性能较差。
- (2) 场地地层分布不均匀,局部为原状土,如 3 号库位置,1、4 号库区填土较厚且底部有泥炭质土。
- (3) 场地中间为河道,水位较高,稳定水位最高达 2 m,回填土含水率较高。
- (4) 下部有一层泥炭质土层,埋置深度 11~22 m,厚度 2~8 m,力学强度低,连续性较差,属软弱土夹层,需要重点防治。

表 1 各岩土层主要物理力学指标
Table 1 Mechanics parameters of soils

土层	重度 γ /(kN/m ³)	压缩模量 E_{s1-2} /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ (°)	承载力特征值 f_k /kPa
①素填土	18.1	4.5	15.0	5.0	80
③黏土	18.2	6.8	44.8	12.0	150
③ ₁ 黏土	18.3	7.2	43.5	12.3	145
③ ₂ 有机黏土	17.0	3.6	30.5	6.8	70
④黏土	17.9	7.2	48.1	13.0	160
④ ₂ 泥炭质土	14.3	4.6	33.3	7.9	60
⑤黏土	18.2	8.2	47.2	13.3	170
⑤ ₁ 圆砾	22.0	12.0	3.5	30.0	200

(5) 地基处理施工不能影响周边环境,特别是北面建筑主体施工、塔山路靠近本项目的大直径污水管,不得影响塔山路对面污水处理厂的正常运营。

3.4 地基处理要求

(1) 地基承载力标准值: 单层库房、室外地坪及道路大于 100 kPa, 压缩模量大于 8 MPa。

(2) 按建筑地基基础规范规定倾斜度控制在 3/1 000 内, 同时解决填土、泥炭质土的沉降变形问题。

(3) 标高控制: 室内地坪高出室外地坪 1.30 m, 须回填至交工面标高。

(4) 场地经过地基处理后, 地基土物理力学指标将得到有效改善, 因此单层大跨度建筑物桩基础的设计尽量选择与地坪地基处理工法相协调, 可最大程度的满足地基变形协调, 减小不均匀沉降。

3.5 方案设计

根据场地地层情况、周边施工环境、工程特点以及库区地基处理要求, 场地内人工填土采用普通强夯、强夯置换和强夯碎石桩处理。采用孔内强夯碎石桩工艺, 以减小强夯震动对邻近建筑的影响, 库区采用孔内强夯碎石桩保证碎石料穿透填土层, 保证处理效果。CFG 桩处理深部软弱泥炭质土, 同时调整地基的不均匀沉降。库内填高 1.30 m 的部分, 分两层进行碾压处理, 采用冲击碾压和振动碾压相结合的处理方法。

地基处理划分为 5 个区域, 其中 I 区采用普通强夯+强夯碎石桩+满夯工艺, II 区采用普通强夯(两遍)+满夯工艺, III 区采用普通强夯+满夯+CFG 桩工艺, IV 区采用孔内强夯碎石桩+满夯+CFG 桩工艺, V 区采用普通强夯+孔内强夯碎石桩+满夯工艺, 其中孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩工法主要应用于场地 IV 区(1 号库), 对应区域场内分布位置如图 3 所示。

3.6 施工工艺参数

场地地基处理分地坪及基础区域。

(1) 地坪

IV 区(1 号库)采用孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩施工工艺: 第一工序进行孔内强夯碎石桩施工, 引孔直径 0.8~1.0 m, 成桩直径约 1.4 m, 孔内夯填碎石料, 强夯能量 1 500 kN·m, 每米夯 3 击, 桩长以穿透填土层 1 m 控制, 桩点间距 4 m×4 m, 按正方形网格状布点, 碎石桩施工完毕后, 全场满夯一遍。第二工序进行 CFG 桩施工, CFG 桩点在强夯碎石桩桩点之间按梅花状插入, 桩点间距 4 m×4 m, 正方形网格布点, 桩径 400 mm, C15 灌

注, 桩长以穿过泥炭质土 1 m 控制, 桩长范围在 18~22 m。孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩施工平面布点图及典型剖面图分别如图 4~5 所示。

库内堆高 1.30 m 平台处理, 采用土料性能稳定的黏土或山皮土回填, 避免采用淤泥、膨胀土等不良土料, 分两层回填碾压, 每层采用 22 t 振动压路机碾压 5 遍, 32 kJ 冲击碾压 20 遍, 振动碾压与冲击碾压交错进行, 期间用推土机对作业面进行推平。

沿场地内地下水上游等位置布置适当降水井, 采用管井降水, 将水位控制在填土层以下, 具体数量根据降水情况确定。

沿场地周边开挖减震沟, 底口宽 1.5 m, 深度 3 m, 减震沟与排水沟共同构成场地的排水系统。

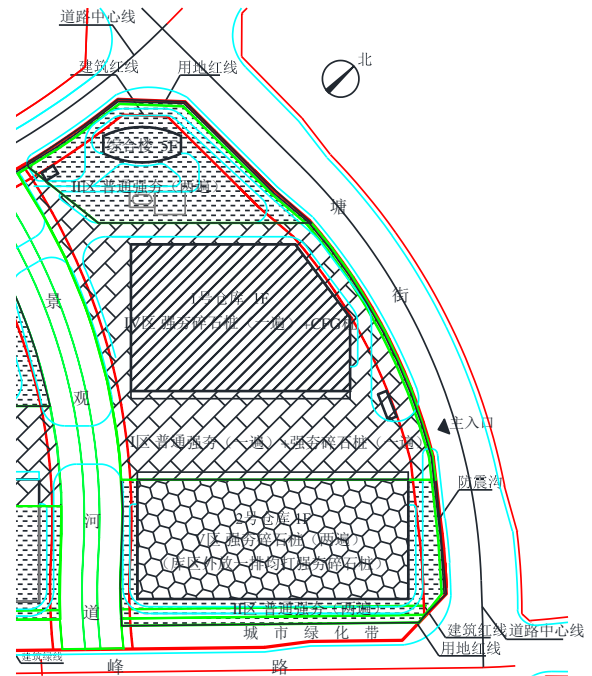


图 3 地基处理分区布置图

Fig. 3 General plan layout according to specific areas

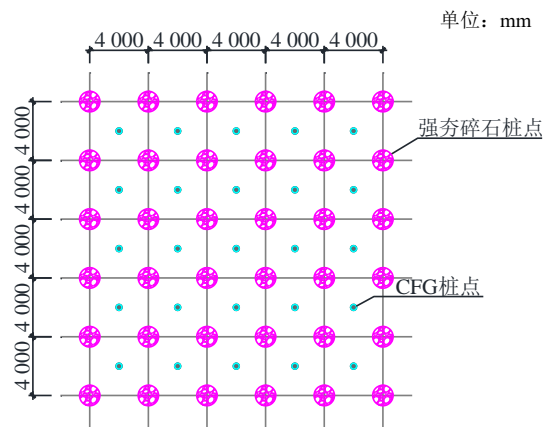


图 4 孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩桩点布置平面图

Fig. 4 Pile layout plan of dynamic compacted gravel pile and CFG pile

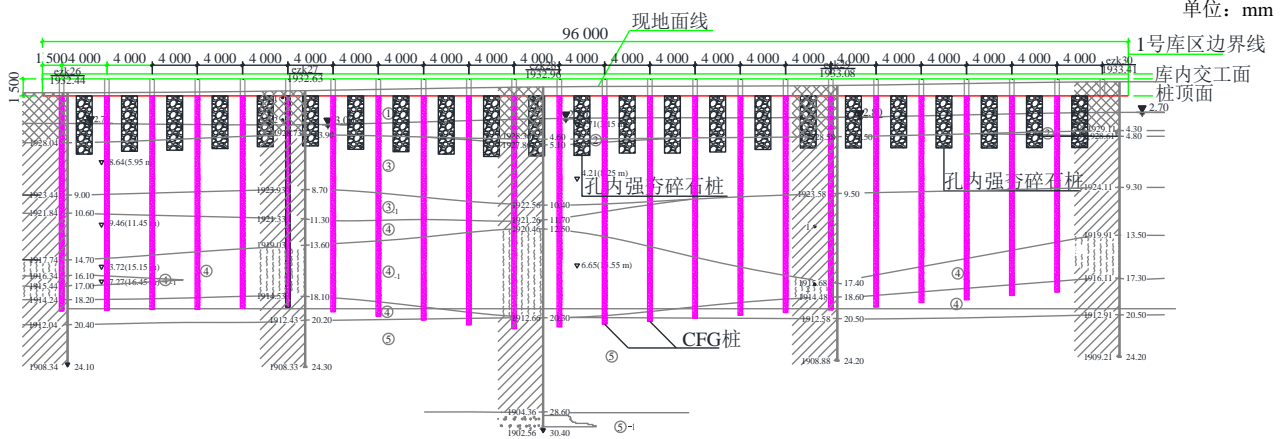


图5 孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩复合地基典型剖面图

Fig. 5 Typical section of composite foundation of dynamic compacted gravel pile and CFG pile

(2) 仓库基础地基

IV区(1号库)存在深层泥炭土,基础处理设计采用CFG桩复合地基工法,与地坪疏桩(CFG桩)工法基本一致,而布桩间距不同。CFG桩桩长19m,混凝土强度为C25,设计复合地基承载力特征值为150kPa,桩顶位置设置厚度为0.5m的级配碎石褥垫层。

已投入使用3年,监测数据显示,地坪沉降量较小,平均下沉9mm。其中主体结构施工期间,地坪沉降量在7~9mm,投入使用两年期间,地坪沉降量在6~8mm,随后沉降趋势进一步减小。仓库投入使用至目前为止,经现场监测结果显示地坪沉降与基础差异沉降较小,一期工程地坪、柱角等均未出现明显裂缝。

4 处理效果分析

4.1 复合地基检测分析

对场地IV区(1号库)孔内强夯碎石桩联合CFG疏桩复合地基进行现场承载力检测,根据规范要求^[1],随机选取5处进行静载试验,试验压板面积为1m²,载荷由40kPa按每级20kPa逐级加载至200kPa,随后卸载至0kPa,检测过程中,实时记录各级荷载下的压板沉降量,对各点结果统计后示于图6。

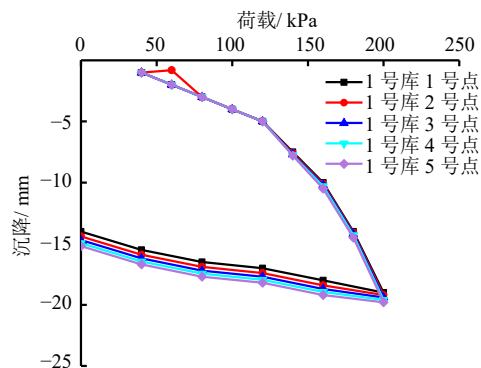


图6 平板静载试验Q-S曲线

Fig. 6 Q-S curve of plate static load test

由图可知,平板静载试验的沉降曲线平稳,说明未出现地层剪切破坏或桩的大尺寸滑动,根据相关规范要求^[1],对水泥粉煤灰碎石桩复合地基,当地基以黏性土、粉土为主时,可取 $S/D=0.01$ 对应的荷载为复合地基承载力特征值,且其值不应大于最大加载量的一半,本次试验取 D 值为1000mm,则总沉降 S 为10mm,从图中可以看出,复合地基承载力特征值均大于100kPa,沉降变形亦较小,复合地基承载力满足设计要求。

4.2 沉降监测分析

在IV区(1号库)地基处理施工完成且水稳层或垫层施工完毕后开始沉降监测,结果见图7。

由图可知,地基处理施工完成近4年,一期工程

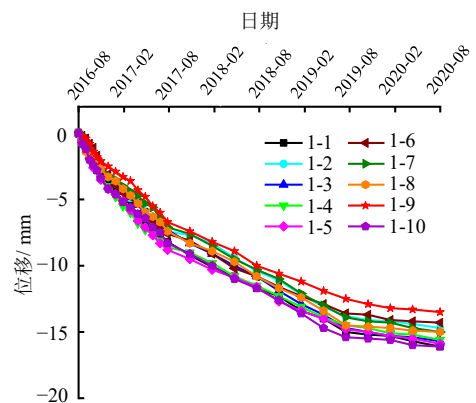


图7 1号库地坪沉降曲线

Fig. 7 Floor subsidence with time of 1# warehouse

5 结 论

(1) 孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩地基处理技术主要用于处理上覆高压缩性软填土, 下覆软弱夹层等复杂软土地基, 利用碎石桩处理表层软土, 提高地基承载力, 利用 CFG 桩处理下部深层软土, 减小地基沉降, 处理深度可达 20~25 m。

(2) 对于附加荷载较低的单层建筑地坪与基础应尽量选用相同的地基加固方法, 根据场地地坪附加荷载大小、地层分布特点, 采用不同夯击能及改变 CFG 桩长方式实现地基变刚度从而实现减少差异沉降效果。

(3) 基于特定施工工艺形成“漏斗状”碎石桩桩身, 可有效防止软土地层孔内强夯过程中的塌孔、缩颈影响, 在工艺上采用低能量强夯, 震动影响极小, 处理效果好, 且桩身填料易获取, 经济性强。

参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
GONG Xiao-nan. Foundation Treatment Manual[M]. Third Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2008.
- [2] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.
LIU Song-yu, ZHOU Jian, ZHANG Ding-wen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.
- [3] 曾华健, 潘忱. 强夯碎石桩联合 CFG 桩复合地基处理效果[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 64-69.
ZENG Hua-jian, PAN Chen. Treatment effect of composite foundation with dynamic compacted gravel pile and CFG pile[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(1): 64-69.
- [4] 曾华健, 伍翔飞, 潘忱, 等. 孔内强夯碎石桩在仓储地基处理中的应用[J]. 土工基础, 2021, 35(3): 302-306.
ZENG Hua-jian, WU Xiang-fei, PAN Chen, et al. Application of dynamic-rammed gravel columns in ground treatment[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(3): 302-306.
- [5] 高建中, 黄玮, 梁永辉, 等. 强夯置换法在高填方工程淤积土处理中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊 1): 329-334.
GAO Jian-zhong, HUANG Wei, LIANG Yong-hui, et al. Dynamic replacement method applied on the alluvial soils treatment of high fill field-leveling project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 329-334.
- [6] 曾华健, 李军, 梅军, 等. 真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 64-70.
ZENG Hua-jian, LI Jun, MEI Jun, et al. Application of vacuum dewatering combined with different dynamic compaction process in soft soil foundation treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 64-70.
- [7] 武崇福, 李文雪, 李文涛, 等. 分级加载下组合渗流碎石桩-CFG 桩复合地基固结解答[J/OL]. 中国公路学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20210803.0929.002.html>.
WU Chong-fu, LI Wen-xue, LI Wen-tao, et al. Consolidation solution of composite foundation of composite seepage gravel pile and CFG pile under graded loading[J/OL]. China Journal of Highway and Transport, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20210803.0929.002.html>.
- [8] 朱彦博, 凌贤长, 唐亮, 等. 软土地路堤-加筋碎石桩复合地基工作状态分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 38-48.
ZHU Yan-bo, LING Xian-chang, TANG Liang, et al. Analysis on working status of composite foundation with geosynthetic-encased stone column and embankment in the soft soil[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1): 38-48.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of housing and urban rural development of the People's Republic of China. Technical Code for Building Foundation Treatment: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Ministry of housing and urban rural development of the People's Republic of China, State general administration of the People's Republic of China for quality supervision and inspection and quarantine. Technical Code for Composite Foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.