

# 孔内强夯碎石桩加固软土地基的变形特性分析

伍翔飞<sup>1</sup>, 曾华健<sup>1</sup>, 嵇汉卿<sup>2</sup>, 刘雪珠<sup>1</sup>, 祝思明<sup>1</sup>, 郑海波<sup>2</sup>

(1. 江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210018; 2. 深圳市苏勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518100)

**摘要:** 本文基于某物流仓储项目软土地基处理工程, 通过室内试验及原位测试, 研究碎石桩处理前后软土层的物理力学指标变化及处理后复合地基承载力情况。建立单桩碎石桩复合地基分析模型, 采用有限元方法, 对施工与使用等附加荷载作用下碎石桩处理前后的复合地基变形特性及孔压消散情况进行了计算, 在此基础上, 进一步分析了不同桩径、桩长及垫层厚度对碎石桩复合地基沉降变形与孔压消散特性的影响。结果表明: 软土地基经碎石桩处理后, 原天然状态下的软土物理力学指标均有所提高, 其中软土状态由天然状态下的流塑状态变为可塑状态, 含水率降低约 22.3%; 与天然软土地基相比, 碎石桩复合地基处理后, 工后沉降及固结时间可减小约 50%; 为平衡成本及处理质量, 碎石桩面积置换率在 0.22 左右, 桩端应穿过软土层底不少于 1 m 较为合适, 且垫层厚度不宜过大, 相关结论可为类似工程提供参考。

**关键词:** 孔内强夯碎石桩; 软土地基; 变形特性; 数值分析; 软土固结

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0069-06

## Deformation characteristics of reinforcement of soft soil foundation with dynamic compaction gravel pile in hole

WU Xiang-fei<sup>1</sup>, ZENG Hua-jian<sup>1</sup>, JI Han-qing<sup>2</sup>, LIU Xue-zhu<sup>1</sup>, ZHU Si-ming<sup>1</sup>, ZHENG Hai-bo<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Geotechnical Engineering Company, Nanjing 210018, Jiangsu, China;

2. Shenzhen Sukan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518100, Guangdong, China)

**Abstract:** Employing a logistics warehousing project as a case study for soft soil foundation treatment, this paper investigated alterations in the physical and mechanical properties of the soft soil stratum pre and post gravel pile treatment, as well as the bearing capacity of the treated composite foundation. This investigation was conducted through a combination of indoor experiments and in-situ testing. An analytical model was developed for a composite foundation consisting of single gravel piles. The finite element method was employed to capture the deformation behaviour and dissipation of pore pressure within the composite foundation both pre and post gravel pile treatment, considering superloading. An in-depth analysis was conducted to assess the influence of pile diameters, lengths, and cushion thicknesses on the settlement deformation and pore pressure dissipation characteristics of the gravel pile composite foundation. The findings reveal significant improvements in the physical and mechanical properties of the soft soil following gravel pile treatment compared to its original natural state. Specifically, the plasticity of soil transitioned from a flow plastic state to a plastic state, accompanied by a reduction in water content by approximately 22.3%. Moreover, in comparison to a natural soft soil foundation, the post-construction settlement and consolidation period of the gravel pile composite foundation can be halved after treatment. To strike a balance between cost and treatment efficacy, it is recommended that the replacement rate of the gravel pile area be maintained at approximately 0.22. Additionally, it is advisable for the pile end to penetrate the bottom of the soft soil layer by no less than 1 m, and caution should be exercised in controlling the thickness of the cushion layer. These relevant conclusions can provide valuable reference for similar projects.

**Key words:** dynamic compaction gravel pile in hole; soft soil foundation; deformation characteristics; numerical analysis; soft soil consolidation

## 0 引言

软土地基因具有高含水率、高压缩性、低承载力及固结时间长等不良特性,需进行有效的软土地基加固处理以使得地基承载力及沉降特性满足上部主体结构使用要求<sup>[1]</sup>。

碎石桩复合地基作为一种典型的散体材料桩复合地基,桩体无黏结强度、无抗拉与抗弯能力,有较低的抗压和抗剪强度<sup>[2]</sup>,处理后形成桩间加固土与碎石增强体组成的碎石桩复合地基,具有非均质及各向异性的特点,目前主要应用于填土、粉土、黏性土、饱和软土、淤泥质土等地基处理中。在传统强夯置换与孔内深层强夯法基础上,通过改进施工工艺,发展出孔内强夯碎石桩法<sup>[3-7]</sup>,相较于传统强夯(置换)法、深层孔内强夯法、刚性桩(预制桩、CFG桩)及半刚性桩(搅拌桩、旋喷桩)、挖土换填、真空(堆载)预压等方法<sup>[8]</sup>,具有处理效果好、工程造价低等显著优势。但受加固地地质条件、施工工艺及碎石桩置换率等影响,碎石桩的作用机理存在较大差异。对于黏土等土质较好地基主要是靠碎石桩的振动挤密使桩周土体密实,降低土的压缩性,提高地基承载力;而对于饱和软土地基,则首先应当降低软土地下水位及含水率,为强夯碎石桩提供较好的施工环境,随后通过置换与挤密作用与软土形成复合地基,并同时作为竖向排水通道加速软土固结,提高软土地基承载力<sup>[9]</sup>。

以沿海某高含水率的软土地基处理工程为例,开展室内土工试验及原位试验,分析孔内强夯碎石桩处理前后桩间软土的物理力学特性的变化情况。依据场地软土地质条件及土体物理力学参数,采用有限元方法,分析孔内强夯碎石桩处理前后桩间软土基本物理力学指标变化及碎石桩复合地基承载力情况,随后采用有限元方法分析碎石桩处理前后附加荷载作用下的地基沉降与超孔隙水压力时程变化,并在此基础上,进一步对复合地基沉降固结特性的影响参数进行分析,以此研究强夯碎石桩加固软土地基的变形特性,评价地基处理效果。

## 1 工程概况

### 1.1 地质情况

项目地点位于浙江湖州平原,原场地为低洼池塘区域,进行地基处理前进行了清淤工作,清淤完成后,下部尚存厚度4~8 m的高压缩性淤泥质粉

质黏土层,属软弱地基。场地勘察揭露主要地层情况如表1所示。

表1 主要地层情况描述  
Table 1 Description of main geological conditions

厚度/m	地层描述	承载力特征值/kPa
0.3~3.0	填土,以黏土为主,为近期回填的黏土,均匀性差,动探( $N_{63.5}$ )击数为3~9击/10 cm	—
0.6~4.2	粉质黏土,软塑,属中高压压缩性土	80
0.8~8.2	淤泥质粉质黏土,含水量高,流塑,局部渐变淤泥,属高压压缩性土	60
2.1~20.0	粉质黏土,硬可塑为主,局部为黏土,属中高压压缩性土	140
0.5~11.4	全风化凝灰岩,岩芯呈砂砾状,遇水易分解,标贯( $N$ )击数为16~26击/30 cm	310

由表1可知:

(1) 场地淤泥质黏土层厚度较大,在后续场地填方及仓库使用荷载作用下,软土层沉降大,沉降固结时间长,同时,软土层厚度变化较大,后期易产生不均匀沉降。

(2) 淤泥质黏土层具有高含水量及大孔隙比特征,强夯施工过程中,易产生弹簧土,需采取降水措施,降低含水量及地下水位,为强夯提供施工环境。

### 1.2 地基处理设计方案

项目场地拟建设物流仓库面积达84 000 m<sup>2</sup>,软土范围广,处理面积大,为保证地基承载力及变形满足建设项目要求。依据地层情况,并经设计方案比选,部分库区及库外道路采用孔内强夯碎石桩处理,具体处理方案为轻型井点降水+孔内强夯碎石桩+满夯+碾压,详细方案如下。

两遍强夯碎石桩,第一工序强夯碎石桩施工:先用长螺旋钻机或旋挖机成孔,成孔直径1.1~1.2 m,碎石桩成桩平均直径约1.5 m。桩孔填碎石料,强夯夯击能量1 200~1 500 kN·m,每个桩点夯12击。桩长以6.0~8.0 m控制,桩点间距4 m×4 m,正方形网格状布点。第二工序强夯碎石桩施工:在第一工序强夯碎石桩桩点间呈梅花状插入强夯碎石桩夯点,夯点间距4 m×4 m,正方形网格布点,桩孔填碎石料。

第二遍点夯结束后进行满夯,夯锤直径2.2~2.5 m,夯击能量1 000~1 500 kN·m,每点两击,相互搭接1/4。满夯后采用22 t压路机碾压密实,至少3~5遍;

最后分层回填碾压到交工面, 每层 300~500 mm; 满夯面与最后交工面采用 25 kJ 冲击碾碾压累计 20 遍, 强夯碎石桩夯点平面布置如图 1 所示。

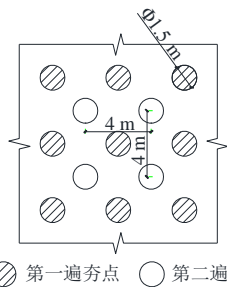


图 1 强夯碎石桩夯点平面布置图

Fig. 1 Plane layout of dynamic compaction gravel piles

由于场地软土含水量大, 地下水位较高, 强夯施工前先采用轻型井点进行真空降水, 强夯施工期间需保证水位降低至软土层底。

## 2 土工试验分析

为了解碎石桩处理前后软土层物理力学特性指标变化, 对碎石桩处理前后的软土地基开展了室内土工试验及原位载荷试验分析。

### 2.1 室内土工试验分析

试验在场地全场满夯后, 取天然状态(未处理)软土层及处理 28 d 后碎石桩复合地基桩间土进行土的基本物理力学特性试验、室内直剪试验(固结快剪)及固结试验, 具体指标如表 2~3 所示。

表 2 物理力学特性指标表  
Table 2 Physical and mechanical parameters

试验阶段	含水率 $w/\%$	比重 $G_s$	干密度/孔隙比 $(g/cm^3)$	液限 $\omega_L$	塑限 $\omega_P$	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$
处理前	42.0	2.72	1.23	41.8	28.8	13.0	1.02
处理后	32.5	2.71	1.24	38.2	27.5	10.7	0.47

注: 塑性指数取 76 g 圆锥仪沉入土中深度 17 mm 时测定的液限计算。

表 3 直剪及固结试验指标表  
Table 3 Parameters of direct shear and consolidation test

试验阶段	固结快剪		固结试验	
	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$	压缩系数 $a_{1-2}/MPa^{-1}$	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa$
处理前	7.5	6.2	1.20	2.1
处理后	12.3	9.5	1.13	2.5

由处理前后试验结果对比可知:

(1) 处理前, 淤泥质黏土含水率为 42%, 液性指数为  $1.02 > 1$ , 呈流塑状态; 经强夯碎石桩复

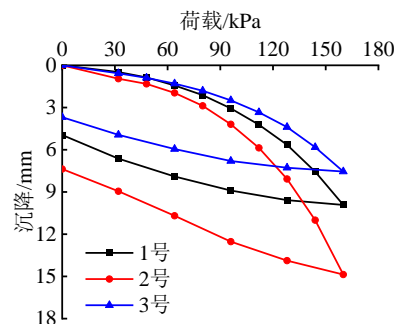
合地基处理后, 含水率降至 32.5%, 液性指数降至 0.47, 整体呈可塑状态。

(2) 经强夯碎石桩处理后, 软土含水率降低, 干密度增大, 孔隙比减小, 压缩系数减小, 抗剪强度指标及压缩模量增大, 但前后指标变化幅度较小, 主要原因在于施工完毕后, 碎石桩复合地基尚未进行上部加载, 地基固结较慢。

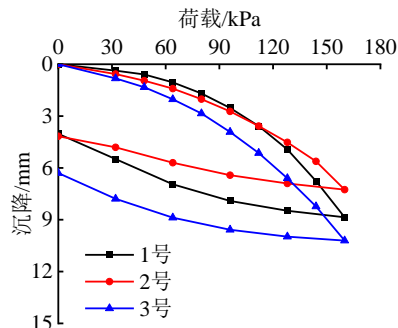
(3) 强夯夯击过程中, 土层超孔隙水压力陡增, 周边已施工碎石桩出现明显冒水现象, 满夯施工完毕, 且垫层施工过程中, 碎石桩顶存在水流出现象, 表明碎石桩发挥了其在土层中的竖向排水通道作用。

### 2.2 载荷试验分析

为评价处理后强夯碎石桩复合地基的整体承载特性, 地基处理施工完毕 28 d 后进行原位平板载荷试验, 试验采用慢速维持荷载法, 使用油压千斤顶加载, 加载反力装置采用堆载平台反力装置, 堆载物采用混凝土配重块。复合地基载荷试验采用方形承压板, 承压板面积为 一根桩承担的处理面积, 承压板底面铺设中砂垫层, 垫层厚度为 100 mm。依据规范要求, 在场地经孔内强夯碎石桩处理后的 1 号库区、2 号库区地坪范围内, 分别随机选取 3 个有代表性的点进行复合地基静载荷试验, 对应试验结果  $P-S$  曲线如图 2 所示。



(a) 1号库区



(b) 2号库区

图 2 强夯碎石桩复合地基静载荷试验  $P-S$  曲线  
Fig. 2  $P-S$  curves of static loading tests for dynamic compaction gravel pile composite foundation

平板载荷试验沉降曲线平稳, 说明未出现地层

剪切破坏。根据规范要求<sup>[10]</sup>，取  $s/b$  ( $s$  为载荷载板沉降、 $b$  为载荷载板宽度或直径) 等于 0.01 时对应的压力，且其值不大于最大加载压力的一半作为地基承载力特征值，从图 2 中可以看出，本次试验处理后地基承载力特征值均不小于 80 kPa，沉降变形也较小，满足设计要求。软弱地基孔内强夯碎石桩处理效果达到预期。

### 3 数值计算分析

为探究孔内强夯碎石桩加固软土地基的变形特性及相关施工参数对变形特性的影响，采用流固耦合方法对软土地基及碎石桩-软土复合地基进行施工及附加荷载作用下沉降变形的有限元计算，得到处理前后碎石桩复合地基沉降及孔压随固结时间的变化关系。

#### 3.1 计算模型

碎石桩复合地基中，桩点位可按方形、三角形型式进行全场均匀布置，以发挥桩与桩间土共担荷载作用，故可按面积等效原则确定单桩处理面积。为便于分析计算，将其等效为圆形，则单桩处理面积的等效圆直径，对于正方形布桩可按  $d_e=1.13s$ ，其中  $s$  为桩间距。项目设计方案采用正方形布桩，间距 4 m×4 m，第二遍点位在第一遍间内插，故单桩有效处理面积为 8 m<sup>2</sup>，等效圆直径为 3.2 m，碎石桩简化为桩径 1.5 m 的圆柱体（对应置换率  $\eta=0.22$ ），结合地层分层情况确定碎石桩复合地基模型及模型网格划分如图 3 所示。

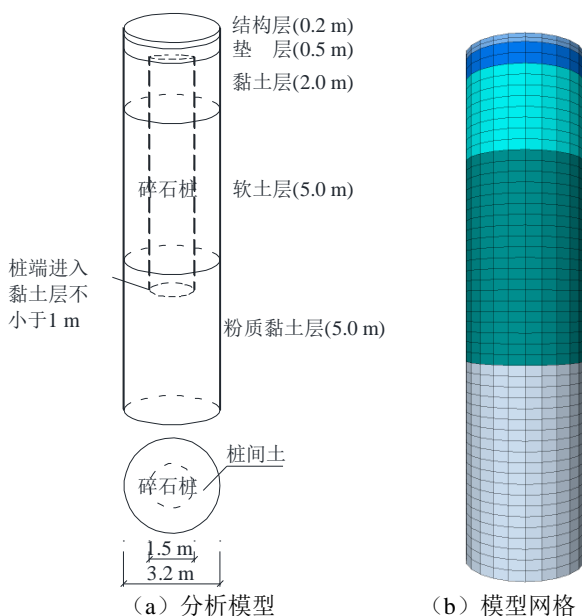


图 3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical model

模型中依据设计方案，桩顶位于上部黏土层顶，桩端进入下部粉质黏土层底不小于 1 m，计算参数依据土工试验及地区经验取值综合分析确定（表 4），依据相关研究，将碎石桩和土体视为理想弹塑性体，并服从 Mohr-Coulomb 屈服准则时，可达到计算所需的精度要求<sup>[11]</sup>。考虑强夯碎石桩的成桩方式对桩土剪切面的影响，在竖向荷载作用下，碎石桩与土体界面一般不发生相对滑动，接触面满足变形协调关系<sup>[12]</sup>。模型侧边设置水平位移约束，底边法向位移约束，顶边自由，设置模型侧边及底边均为不透水边界，碎石桩土界面设置透水边界。模型在自重条件下达到地应力及孔压平衡。

表 4 模型计算物理力学参数取值表

材料	重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	渗透系数 $k/(\text{m/d})$
结构层	25.0	28 000	0.30	—	—	—
垫层	20.0	16	0.30	5	20	$8.64 \times 10^{-3}$
黏土层	18.0	20	0.28	20	12	$2.60 \times 10^{-4}$
软土层	17.5	6	0.34	12	9	$4.32 \times 10^{-5}$
粉质黏土层	18.1	30	0.30	30	20	$1.73 \times 10^{-4}$
碎石桩	21.0	50	0.30	—	30	$4.32 \times 10^{-2}$

注：碎石桩参数取值参考文献[13]。

#### 3.2 计算过程

附加荷载作用下碎石桩复合地基的变形本质上是一种固结沉降过程，在固结过程中，伴随孔隙水的排出，孔压逐渐消散，引起有效应力增加，进而导致土体的压缩沉降，此过程渗流与变形同步进行，计算采用流固耦合方法。依据施工工况及使用堆载情况设计计算荷载，附加荷载时程关系如图 4 所示。计算过程中，垫层及结构层施工采用材料激活方式实现。

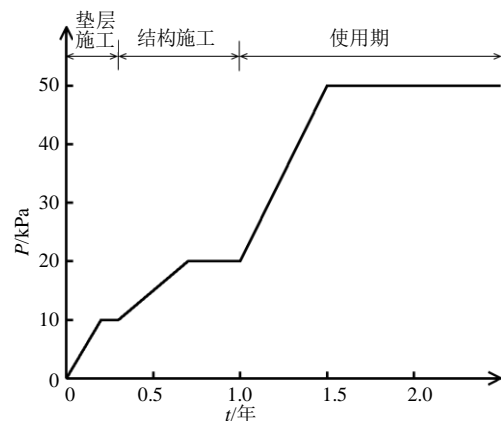


图 4 附加荷载时程关系

Fig. 4 Time history curve of superloading

### 3.3 天然地基沉降特性分析

考虑软土地基在未经任何加固处理时, 附加荷载作用下, 地基沉降特性及超孔隙水压力随固结时间的变化如图 5~6 所示, 各沉降测点取模型几何中心自顶层向下不同深度处。

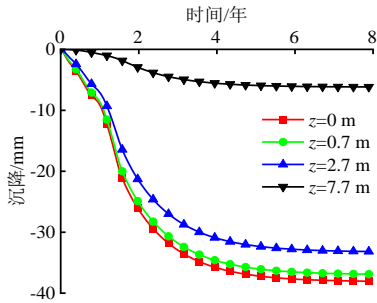


图 5 天然地基沉降时程曲线

Fig. 5 Time history curves of settlement for natural ground

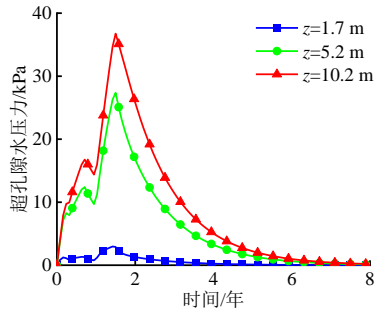


图 6 天然地基超孔隙水压力时程曲线

Fig. 6 Time history curves of excess pore water pressure for natural ground

图 5~6 中不同深度  $z$  分别表示各土层顶及各土层中心, 地坪附加荷载作用下天然软土地基地坪最大沉降达到约 38 mm 左右, 工后沉降约 28 mm, 在持续沉降时间达到 4.5 年时, 地基固结度达到 95%, 随后沉降渐趋于稳定。不同深度地基土层沉降自上而下依次减小, 因各土层压缩模量差异, 其中软土层最大沉降量为 27 mm, 占总沉降量比例约 70%。附加荷载作用瞬间, 地基内部产生超孔隙水压力, 其中上部黏土层距排水垫层最近, 超孔压增加的同时迅速消散, 最大超孔压值为 2.96 kPa, 而下部软土层及底部粉质黏土层最大超孔隙水压力分别达到 27.4 kPa 及 36.7 kPa, 从图 5~6 中可以看出, 按天然软土地基未做加固处理下, 地基沉降固结时长超过 6 年, 工后持续沉降达到 5 年。

### 3.4 强夯碎石桩复合地基沉降特性

考虑软土地基在经强夯碎石桩加固处理后附加荷载作用下的地基沉降特性, 并同时考虑不同置换率  $m$ 、桩长  $L$  及垫层厚度  $h$  的影响, 得到碎石桩复合地基沉降特性及桩间土超孔隙水压力随固结时间的变化如图 7~8 所示。

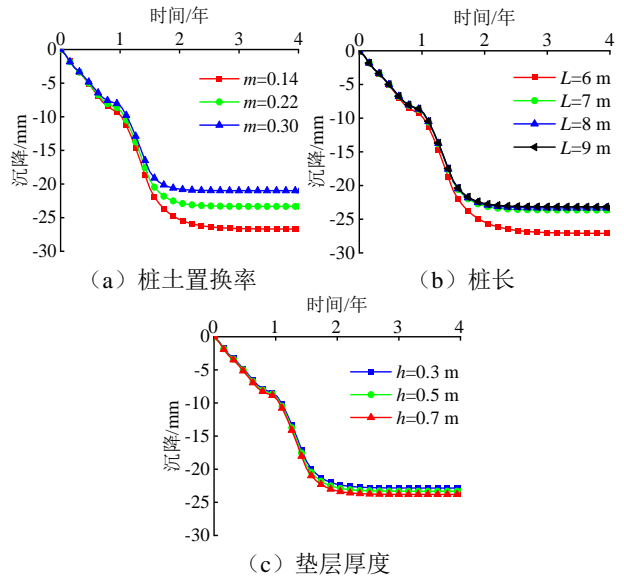


图 7 碎石桩复合地基的沉降特性

Fig. 7 Characteristics of settlement for gravel pile composite foundation

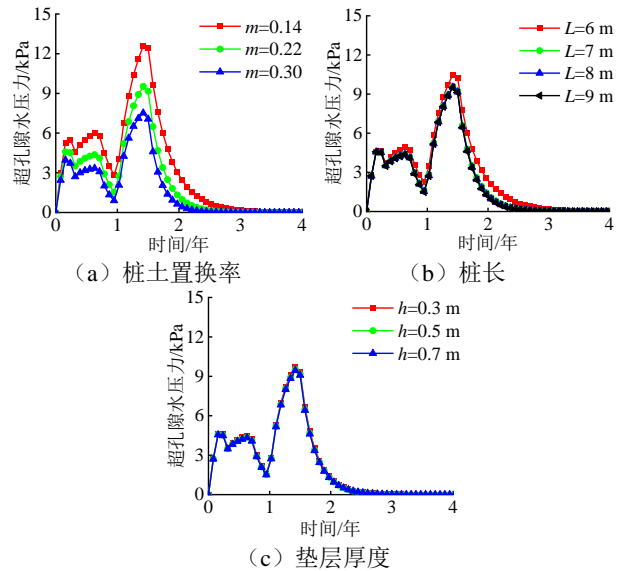


图 8 碎石桩复合地基的超孔隙水压力变化

Fig. 8 Changes in excess pore water pressure of gravel pile composite foundation

由图 7~8 可知: (1) 碎石桩复合地基整体沉降随面积置换率  $m$  的增加而减小, 在  $m=0.22$  (基本工况) 时, 总沉降值约 23 mm, 当  $m$  减小至 0.14 时, 沉降增加约 4~27 mm, 而  $m$  增加至 0.30 时, 沉降减小 2~21 mm, 说明在面积置换率由 0.14 增加至 0.30 过程中, 增加同等面积置换率对降低碎石桩复合地基沉降的贡献逐渐减小, 且同时易增加地基处理的成本。另外与天然软土地基相比, 经强夯碎石桩加固处理后, 工后沉降由 28 mm 减小至 14 mm, 减小幅度 50% 左右, 固结时间由 5 年缩短至 2.5 年。地基超孔隙水压力受不同加载阶段及加载幅值影响, 在加载和间歇过程中, 土体中的超孔隙水压力



也随之表现出增加和消散现象。

(2) 图7~8中,  $L=6\text{ m}$ 、 $7\text{ m}$ 、 $8\text{ m}$ 及 $9\text{ m}$ 分别表示碎石桩端处理至距软土层底 $1\text{ m}$ 处、至软土层底、穿透软土层 $1\text{ m}$ 及穿透软土层 $2\text{ m}$ 。从图7~8中可以看出, 当碎石桩端未穿透软土层时, 由于桩端仍然存在一定厚度高压缩性软土, 附加荷载作用下, 地坪总沉降值明显大于桩端处理至软土层底及穿透软土层工况, 且固结时间相对更长; 而在桩端至软土层底基础上, 继续加大桩长, 减沉效果并不明显。对于实际工程, 地层变化较复杂, 软土层厚薄不均, 标高起伏较大, 设计时则一般以桩端穿过软土层不小于 $1\text{ m}$ 为标准, 以保障不同区域软土处理到位。

(3) 垫层作用主要是平衡碎石桩与桩间土承担上部荷载的应力比, 同时兼做地基的顶层排水通道。从计算结果看, 垫层厚度从 $0.3\text{ m}$ 增加至 $0.7\text{ m}$ 时, 复合地基沉降逐渐增加, 但总体影响较小, 对孔压消散时间几乎无影响, 但增大垫层厚度可能会丧失碎石桩作为复合地基中首要承载体的作用, 同时随垫层厚度的增加, 其压缩变形影响逐渐增大, 亦应当考虑其对工后沉降的影响。

## 4 结 论

以某高压缩性软土地基处理工程为例, 采用土工试验与数值计算相结合的方法分析了孔内强夯碎石桩对于软土地基的处理效果, 并对相关工程参数影响进行了分析, 得到主要结论如下:

(1) 强夯碎石桩作为一种散体材料桩, 通过强夯夯扩作用, 起到对软土地基的置换及挤密作用, 同时可作为竖向排水通道, 加速软土层的排水固结, 处理后桩间土含水率及孔隙比均有所减小, 复合地基承载力特征值达到设计要求。

(2) 与天然软土地基相比, 碎石桩加固处理后, 附加荷载作用下的复合地基总沉降、工后沉降及固结时间减小约 $50\%$ , 极大缩短了项目投入运营时间, 减小了工后沉降对地坪影响。

(3) 对于以强夯碎石桩作为软土地基的处理方法应用中, 碎石桩面积置换率在 $0.22$ 左右较为合适, 为减小工后沉降, 碎石桩端应穿过软土层底不少于 $1\text{ m}$ 。

## 参考文献

[1] 周健, 姚浩, 贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研

究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1685-1688.

ZHOU Jian, YAO Hao, JIA Min-cai. Research on technology for shallow treatment of large-area soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1685-1688.

[2] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.

ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.

[3] 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.

[4] 白冰, 徐华轩, 刘海波, 等. 强夯置换法处理松软土地基若干问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3001-3006.

BAI Bing, XU Hua-xuan, LIU Hai-bo, et al. Some problems on dynamic replacement method to improve soft soil ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3001-3006.

[5] 中国工程建设标准化协会. 孔内深层强夯法技术规程: CECS 197: 2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Down-Hole Dynamic Compaction: CECS 197: 2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.

[6] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.

DONG Bing-yin, SHUI Wei-hou, QIN Shao-jie. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 1-16.

[7] 王迎丰, 曾华健, 潘忱, 等. 孔内强夯碎石桩联合 CFG 疏桩施工技术研究[J]. 地基处理, 2022, 4(2): 109-115.

WANG Ying-feng, ZENG Hua-jian, PAN Chen, et al. Study of construction technique for dynamic compacted gravel pile combined with CFG pile[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(2): 109-115.

[8] 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.

(下接第 83 页)