

文章编号: 1007-2993(2023)03-0303-05

载体桩在奉节草堂地区卵石地层中的应用研究

李均山¹ 郭宇²

(1. 核工业(天津)工程勘察院有限公司, 天津 301800;

2. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401120)

【摘要】 载体桩作为一种新型的桩基础形式近年来在工程中被广泛运用,其基本原理是通过柱锤夯击成孔并对桩端以下土层及填料夯实形成复合承载体,提高单桩竖向承载力。目前载体桩在砂土、黏性土、粉土及软土中均取得了一定的研究成果,而在卵石地层中的研究较少。以奉节地区某标准厂房桩基工程为例,研究载体桩在奉节草堂地区卵石地层的设计与施工,结合载荷试验成果对载体桩受力机理分析。研究表明:以卵石作为持力层的载体桩在奉节草堂地区具有较好的适用性,静载试验与沉降观测表明载体桩承载性能良好,是一种安全经济的基础形式;载体桩静载试验 $Q-s$ 曲线一般呈缓变型,表明载体桩在卵石地层中的受力形式更接近于端承桩;卵石地层中载体桩的适用性与卵石成分、级配密切相关,土体大颗粒孤石可能使柱锤夯击受阻,施工前应先行试桩及超前地质钻探。

【关键词】 载体桩; 卵石; 载荷试验; 沉降

【中图分类号】 TU 473.1

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.008

Applied Research of Carrier Pile in Pebble Stratum in Caotang Area of Fengjie

Li Junshan¹ Guo Yu²

(1. Nuclear Industry (Tianjin) Engineering Survey Institute Co., Ltd., Tianjin 301800, China; 2. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade of Chongqing Institute of Geology & Mineral Resources Survey, Chongqing 401120, China)

【Abstract】 As a new form of pile foundation, carrier pile has been widely used in engineering in recent years. Its basic principle is to tamp the hole through column hammer and tamp the soil layer and filler below the pile end to form a composite bearing body, so as to greatly improve the vertical bearing capacity of single pile. At present, the carrier pile has achieved some research results in sandy soil, cohesive soil, silt and soft soil, but there is less research in pebble stratum. Taking the carrier pile project of a standard plant as an example, the design and construction of carrier pile in pebble stratum in Caotang area were studied, and the stress mechanism of carrier pile combined with the load test results was analyzed. The results show that the carrier pile using pebbles as the bearing layer has good applicability in the Caotang area of Fengjie. Static load tests and settlement observations indicate that the carrier pile has good bearing performance and is a safe and economic foundation form. the $Q-s$ curve is generally of slow variation type, indicating that the stress form of carrier pile in pebble stratum is closer to that of end bearing pile. The applicability of carrier pile in pebble stratum is closely related to pebble composition and gradation. Large particle boulder in soil may hinder the tamping of column hammer. Pile test and advance geological drilling should be carried out before construction.

【Key words】 carrier pile; pebbles; load test; settlement

0 引言

大型房屋建筑和市政工程上部荷载较大,对地基基础承载力和变形有较高的要求。传统灌注桩、预制桩因其承载力高、安全性好,而被广泛应用于大型工程中。但在有些特殊情况下,如成孔困难,持力层工程性质相对较差或埋深较大的情况下,采用传统灌注桩、预制桩经济性较差。针对上述问题,近年来

载体桩作为一种新型的基础形式在工程中被广泛运用。

载体桩是对桩身以下土层经夯击形成承载体,由桩身和载体构成的桩^[1]。载体桩承载力高的原因在于桩端土体密实,通过夯击填料挤密土体,从而提高桩基承载力。载体桩从受力机理上分析,钢筋混凝土桩身相当于传力构件,载体相当于扩展基础,上部荷载通过桩身传递到载体,再通过载体逐级扩散到持

作者简介:李均山,男,1986年生,汉族,湖北宜昌人,硕士,高级工程师,主要从事岩土勘察设计研究。E-mail: 383640126@qq.com

力层。载体形成后,通过三击贯入度来控制载体施工质量,以确保载体能够有效提供承载力^[2]。目前,国内针对不同的地质条件,对于载体桩设计理论及施工工艺已有较深入的研究^[3-6]。

杜明芳等^[7]研究载体桩在密实砂土层中的应用,结果表明载体桩在密实砂土中的计算值偏于保守。王建安等^[8]通过研究载体桩在陇南粉质黏土地区应用,结果表明载体桩较灌注桩更具经济性。李辉^[9]通过研究某百米高程项目采用载体桩筏基础,在节约投资及工期方面取得了良好的效果。张培成等^[10]研究了饱和软土地基载体桩,结果表明载体桩能够满足高承载力要求,并可以在地基中深部有相对硬层的场地中取代预应力管桩。刘学等^[11]对卵石层复合夯扩桩载荷试验进行研究,认为承载力由桩身材料控制。

以上文献主要是研究载体桩在砂土、黏性土中

的应用,目前国内对载体桩在卵石地层中的应用研究较少。以奉节草堂地区某载体桩工程为例,对卵石层载体桩设计、施工及加固机理进行分析研究,为该地区类似工程提供参考。

1 工程概况及场地地质条件

1.1 工程概况

奉节县草堂镇工业园区某标准厂房建设工程,采用框架结构,长 84 m,宽 24 m,层数为 4 层,建筑高度 20.40 m,柱距 9.0~13.50 m。本工程采用桩基础,基础埋深 6.0~12.0 m。

1.2 场地地质条件

勘察报告显示,场地位于草堂河河谷及阶地,现状场地已进行整平,地形较平缓。场地南侧靠近草堂河区域存在稳定地下水,埋深约 5.0~8.0 m。场地地层分布及各岩土层物理力学参数见表 1、图 1。

表 1 场地地层及物理力学参数

地层序号	地层名称	天然重度/ (kN·m ⁻³)	层厚/m	地层特征	承载力特征值/ kPa	压缩模量/ MPa	极限端阻力 标准值/kPa	极限侧阻力 标准值/kPa
①	素填土(Q ₄ ^{ml})	19.0	0.5~4.0	松散,不均匀				
②	卵石土(Q ₄ ^{al+pl})	19.0	2.0~7.0	稍密,不均匀	140	5.0	1200	55
③	卵石土(Q ₄ ^{al+pl})	22.0	4.0~13.0	稍密,不均匀	140	24.0	1200	140
④	碎石土(Q ₄ ^{dl+cl})	22.0	1.0~11.0	稍密,不均匀	300	21.0	1200	140
⑤ ₁	强风化泥灰岩(T ₂ b ₁)	22.0	1.0~5.0	不均匀	300	30.0	1200	140
⑤ ₂	中等风化泥灰岩(T ₂ b ₁)	24.0		均匀	3504	不可压缩	3000	240

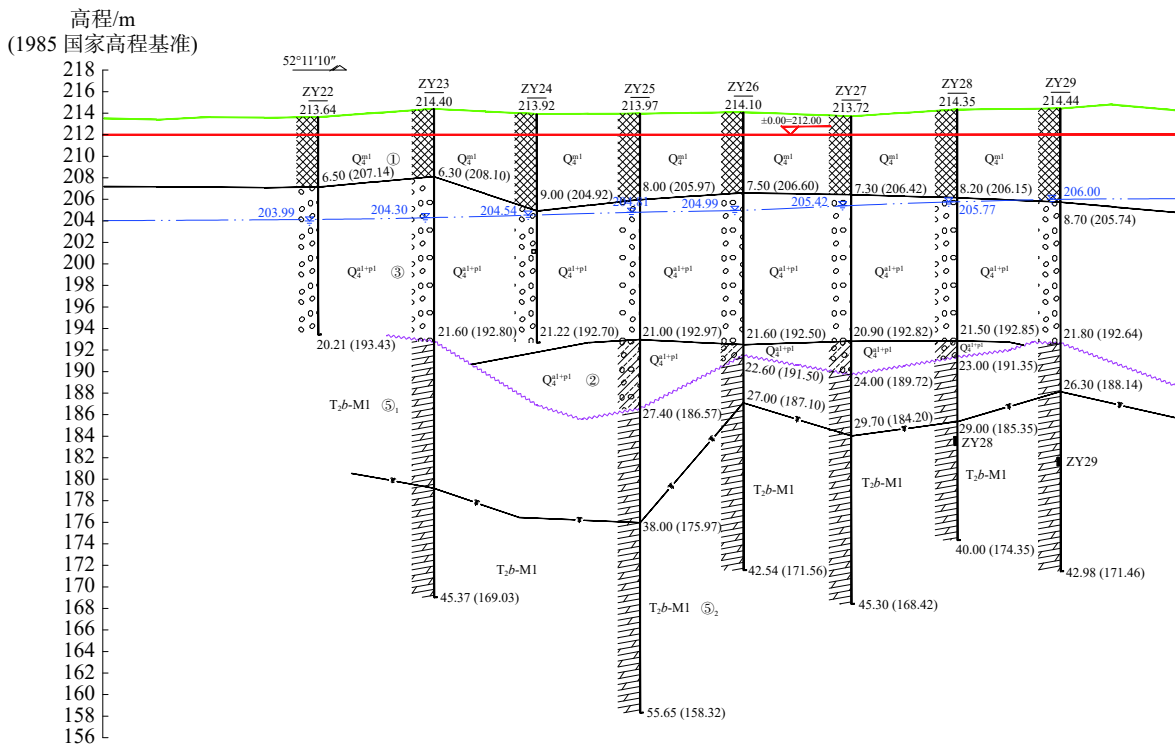


图 1 场地典型地质剖面图

根据岩土工程勘察报告建议, 卵石及中等风化泥灰岩均匀性较好, 可用作桩端持力层; 碎石土、强风化泥灰岩均匀性差, 不宜用作桩端持力层。

2 载体桩设计与施工

2.1 载体桩设计方案

草堂镇地处渝东北, 以山地地貌为主, 基岩埋深深浅不一, 常规的基础设计思路是将基础置于基岩之上。针对本工程地质条件, 若采用浅基础, 以卵石层作为持力层, 则承载力不足, 且沉降不易控制。若采用灌注桩置于基岩, 则卵石层成孔困难, 需采取护壁措施, 且下伏基岩岩质较软、埋深大; 经计算, 平均桩长须大于 25.0 m, 桩径大于 1.2 m 才能满足承载力要求, 经济性差。考虑上述两种方案缺点后, 综合现场试桩情况, 考虑采用以卵石层为持力层的载体桩基础方案。由于载体桩施工时, 利用柱锤冲击桩端土体, 对桩端卵石层进行加固, 使土体趋于密实, 承载力提高, 且卵石埋深一般小于 10.0 m, 桩长得以控制, 工程安全性及经济性均可得到保证。

本工程桩基础设计等级为乙级, 载体桩设计桩径 500 mm, 单桩承载力特征值 1500 kN, 桩身混凝土强度为 C30。桩端以卵石层作为持力层, 最小桩身长度不小于 5.0 m。根据《载体桩技术标准》(JGJ/T 135—2018), 载体桩竖向承载力按式(1)、式(2)计算。

$$R_a = f_a \cdot A_e \quad (1)$$

$$f_a = f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (2)$$

式中: R_a 为载体桩竖向承载力特征值, kN; f_a 为经深度修正后的载体桩持力层地基承载力特征值, kPa; A_e 为载体等效计算面积, m^2 , 宜按地区经验确定, 无地区经验且桩径为 450 ~ 550 mm 时可按《载体桩技术标准》(JGJ/T 135—2018)表 4.2.3 选取, 当桩径为 500 ~ 800 mm 时, 表中 A_e 值应乘以 1.1 ~ 1.3, 桩径小时取小值, 桩径大时取大值; f_{ak} 为载体桩持力层地基承载力特征值, kPa; η_d 为承载力深度修正系数; γ_m 为载体桩持力层以上土体加权平均重度, kN/m^3 , 水位以下取有效重度; d 为载体桩持力层埋深, m。

经计算 $f_a = 320 + 4.4 \times 19.0 \times (5.0 - 0.5) = 696.2$ kPa。查《载体桩技术标准》(JGJ/T 135—2018)表 4.2.3, 中密卵石所对应的等效计算面积为 $4.0 m^2$, 系数取 1.1, A_e 计算值 $4.4 m^2$ 。计算单桩承载力特征值 $R_a = 696.2 \times 4.4 = 3063.3$ kN, 满足设计要求。

根据不同荷载大小, 桩中心距为 1.6 ~ 2.0 m, 承台下共采用五种布桩形式(见图 2)。

设计桩机锤重 35 kN, 最大冲击能为 3000 kN·m,

施工时应严格控制落距不小于 6.0 m, 夯填干硬性混凝土 $0.5 m^3$, 最后三击贯入度控制在 10 cm 以内。载体桩桩身设计图见图 3。

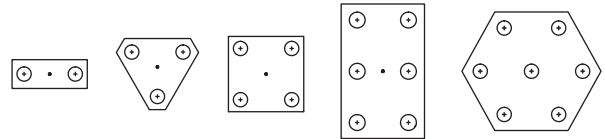


图 2 不同荷载的载体桩布置形式

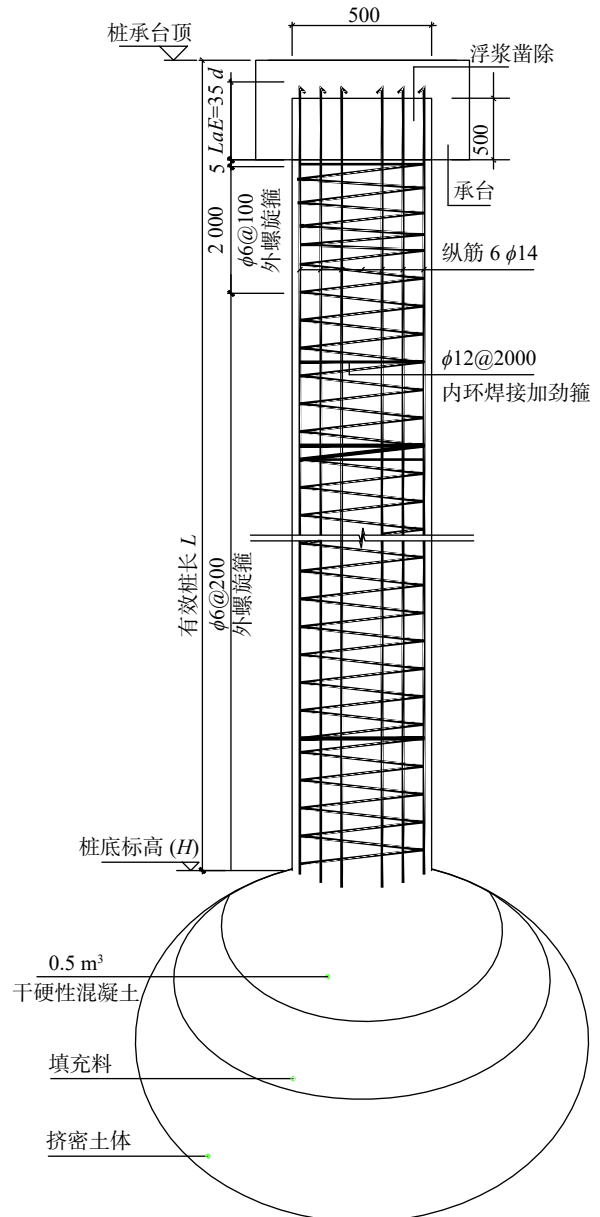


图 3 载体桩桩身结构图

2.2 沉降计算

载体桩沉降计算按等代实体深基础压缩分层总和法计算, 计算公式见式(3)。

$$s = \psi_p p_0 \sum_{n=1}^n \frac{z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}}{E_{si}} \quad (3)$$

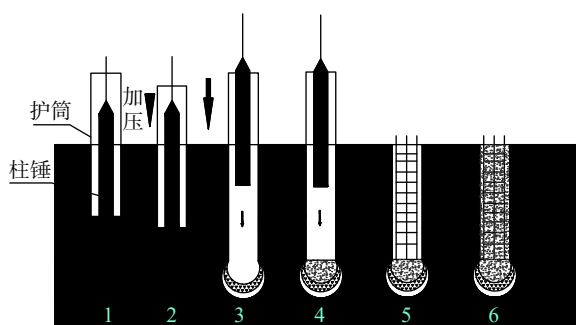
式中: s 为桩基最终沉降量, mm; p_0 为桩端平面的附加压力, kPa; ψ_p 为沉降经验系数; z_i 、 z_{i-1} 为桩端到第 i 层、第 $i-1$ 层土底面的距离, m; n 为桩端平面以下压缩层范围内土层总数; E_{si} 为桩端平面下第 i 层土在自重压力至自重压力附加压力作用段的压缩模量, MPa。

本工程各计算参数取值如下, p_0 为将承台下载体桩考虑为等代实体深基础桩端附加压力值, 单柱荷载取 1500 kN, p_0 计算值为 80 kPa; ψ_p 取 0.30; E_s 按表 1 取值; 沉降计算深度为桩端至中等风化基岩之上的岩土层段, 最大沉降计算深度取 30.0 m, 最小沉降计算深度按桩端置于基岩, 取 0.0 m。计算最终沉降差为 6.50 mm。

本工程结构沉降变形要求沉降差小于 0.002 l_0 (l_0 为相邻柱距), 即沉降差小于 27.0 mm。沉降差计算值小于规范沉降变形允许值 27 mm, 满足要求。

2.3 载体桩施工

载体桩施工采用柱锤夯击、护筒跟进成孔, 达到设计标高后, 柱锤夯出护筒一定深度, 再分批向孔内投入填充料, 用柱锤反复夯实, 达到设计要求后再填入干硬性混凝土夯实, 形成载体, 最后再施工混凝土桩身(见图 4)。



1. 柱锤夯击成孔 2. 护筒加压压入土层
3. 投入碎石并反复夯实挤密
4. 投入干硬性混凝土并反复夯实挤密
5. 下入钢筋笼 6. 灌入混凝土形成载体桩

图 4 载体桩施工过程

柱锤采用直径为 355 mm, 质量为 3500 kg, 落距不小于 6.0 m。柱锤夯击分三次, 第一次为锤夯桩底卵石土体, 第二次为夯实投入的级配碎石, 第三次为夯实填入的混凝土。

施工过程中, 由于卵石地层中局部存在孤石, 粒径约 40.0~110.0 cm, 导致柱锤夯击过程中受阻。解决方法是逐桩进行超前地质钻探, 准确查明孤石分布位置, 柱锤下沉至孤石位置时, 采用潜孔锤进行破碎处理, 然后进行载体桩施工。以实际三击贯入度控制

载体施工质量, 本工程贯入度控制在 10 cm 以内。

3 检测成果及加固机理分析

3.1 荷载试验检测分析

载体桩施工完成后, 采用低应变法检测桩身完整性, 除极少数桩为 II 类桩外, 其余均为 I 类桩, 满足规范要求。为检测载体桩竖向承载力, 抽取 3 根桩进行静载试验, 静载试验采用压重平台加载方式, 慢速维持荷载法, 最大加载值为 3000 kN。试验结果汇总见表 2。

表 2 载体桩竖向静压试验结果

编号	桩长 /m	三击贯入度/cm	最大加载值及对应沉降		承载力特征值及对应沉降		残余沉降 /mm
			/kN	/mm	/kN	/mm	
1#试桩	8.0	7.2	3000	8.66	1500	2.13	6.27
2#试桩	8.0	8.9	3000	15.53	1500	4.44	12.11
3#试桩	8.0	7.8	3000	7.31	1500	2.06	5.28

根据静载试验记录绘制 $Q-s$ 曲线(见图 5)。

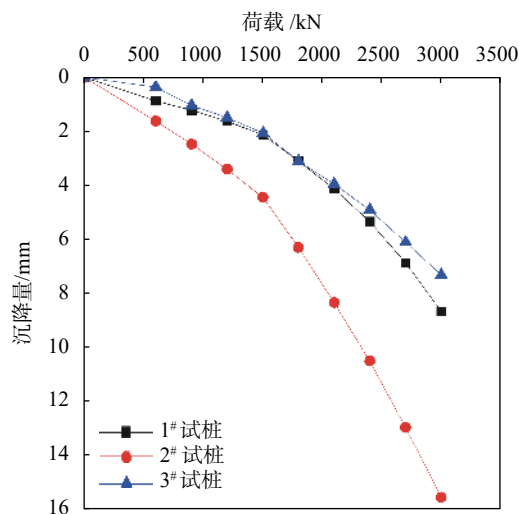


图 5 载体桩荷载-沉降($Q-s$)关系曲线

由图 5 可看出, 单桩极限承载力不小于 3000 kN, 仍未达到荷载终止加载条件, 满足设计要求的 1500 kN 单桩承载力特征值。 $Q-s$ 曲线呈缓变型, 说明由于桩端载体的挤密与加固作用, 载体桩的受力形式更接近于端承桩。达到最大荷载时, $Q-s$ 曲线仍接近直线, 表明土体大部分沉降仍处于弹性压缩阶段, 未进入塑性破坏阶段。三根试桩最大荷载所对应的沉降值分别为 8.66 mm、15.33 mm、7.31 mm, 比规范规定的极限承载力所对应 27 mm 沉降值小得多, 表明载体桩对孔底持力层的夯击加固和应力扩散效果显著。

3.2 建筑沉降观测

为了解载体桩在卵石地层沉降发展情况, 厂房

施工及运营期间进行了沉降观测。沉降观测在建筑的4个角点及长边中部共设置6个沉降观测点,观测周期为2年(基础完工至交付使用后1年),沉降观测曲线如图6所示。

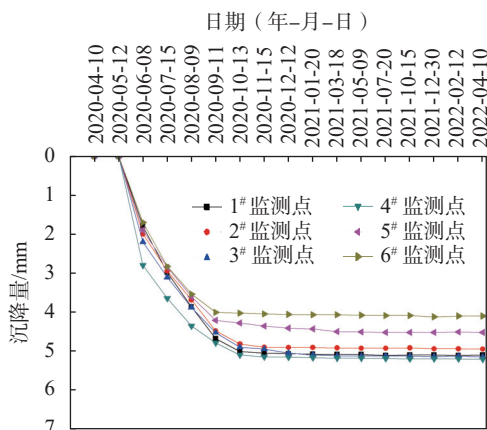


图6 厂房沉降发展曲线

通过沉降发展曲线可知,主体结构完工6个月后,沉降基本趋于稳定,最大沉降量为5.21 mm,小于沉降计算值6.50 mm,后期沉降较小,表明载体桩的使用情况良好。

3.3 加固机理分析

河床天然沉积卵石是由不同粒径固体颗粒组成,粒径由大到小分别为卵石、砾石、砂土,它们自然沉积相互接触形成土体骨架,骨架之间充填空气或水分。载体桩施工过程中柱锤下落冲击土体,空气被挤出,应力扩散使土中固体颗粒向四周产生位移,土体原有的颗粒排列更加紧密(见图7),固体颗粒之间的咬合强度得以提高,土体抗剪强度提高,随着不断向孔内夯填干硬性混凝土,达到设计要求的三击贯入度之后在桩端形成复合载体,载体形成过程中对下部一定影响深度范围内的土体也予以加密,有利于载体桩沉降控制。

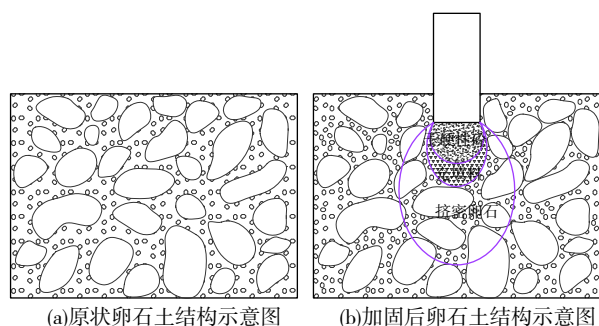


图7 卵石层中载体桩加固机理示意图

综上所述,载体桩能在卵石中有效形成载体,柱锤夯击能由于应力扩散使桩端卵石骨架颗粒集中,土体趋于密实,使桩端承载力大幅提高,有效控制沉

降,表明该种基础形式在奉节草堂地区卵石层是适用的。

4 结论

(1)工程实践表明,在奉节草堂地区采用以卵石层为持力层的载体桩具有较好的适用性,打破了山地工程中以基岩作为桩端持力层的固有观念,取得了显著的社会经济效益。

(2)以卵石作为持力层的载体桩静载试验 $Q-s$ 曲线一般呈缓变型,表明载体桩在卵石地层中的受力形式更接近于端承桩。静载试验与沉降观测表明载体桩承载性能良好,满足工程设计要求。卵石地层加固机理是应力扩散使固体颗粒趋于紧密,加固范围土体抗剪强度提高。

(3)卵石地层中载体桩的适用性与卵石的成分和级配密切相关,施工前应先进行试桩,施工中宜采用超前地质钻探,遇大颗粒孤石可采用潜孔锤进行破碎。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. JGJ/T 135—2018 载体桩技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 王继忠. 载体桩技术的诞生与发展[J]. 建筑结构, 2008, 38(4): 118-119.
- [3] 罗伟, 田敏. 复合载体夯扩桩在湿陷性黄土地基处理防空洞中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, (2): 39-41.
- [4] 张明. 复合载体夯扩桩的施工技术控制[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2006, 7(4): 26-27.
- [5] 兰小华, 刘运超. 载体桩在粉(细)砂土层中的应用[J]. 工程勘察, 2009, (S1): 81-84.
- [6] 陈洪运. 高速铁路载体桩复合地基承载及沉降特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [7] 杜明芳, 王清山, 李帅兵. 载体桩在郑东新区密实砂土持力层中的试验研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(3): 24-27, 32.
- [8] 王建安, 张慧海, 陈琳, 等. 载体桩在陕南粉质黏土地区的适用性研究[J]. 岩土工程技术, 2019, 32(2): 109-114.
- [9] 李辉. 载体桩桩筏基础在高层民用建筑中的应用[J]. 建筑结构, 2016, 46(S1): 803-805.
- [10] 张培成, 孙玉文, 张殿树, 等. 基于饱和软土地基大承载力载体桩试验研究[J]. 河北水利电力学院学报, 2020, (1): 19-23.
- [11] 刘学, 杨晓斌, 刘奋勇, 等. 卵石层中的复合载体夯扩桩静载试验研究[J]. 岩土工程技术, 2002, (3): 175-179.