

DOI: 10.11779/CJGE2020S1031

振冲桩法碎石原料与实际成桩体抗剪强度差异试验研究

江泊洧¹, 王小华², 饶锡保¹, 丁高俊², 张雪杨², 黄 帅²

(1. 长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 振冲桩法通过碎石等透水性材料对软弱地基进行置换挤密而形成复合地基, 以往对该复合地基抗剪强度关注相对较少。由于碎石桩和桩周软土存在挤密和置换作用, 碎石原料与振冲形成的实际桩体不论颗粒组成还是变形受力特性都存在差异, 基于工程现场对成桩体的检测和取样, 在室内开展土工试验, 分析碎石原料与实际成桩体在物理力学参数方面的差异, 试验表明: ①实际成桩体中的细颗粒含量显著高于碎石原料, 其主要来源于振冲施工过程中桩周软土的混(挤)入; ②成桩体最大干密度高于碎石原料, 与碎石原料级配不良及细颗粒混入有直接关系; ③以现场实测压实度各样分别对碎石原料和两种桩间距成桩体开展大型三轴试验, 成桩体整体强度较碎石原料降低约 10%, 考虑其在应力变形特性上的差异, 若以 5%应变对应偏应力求取强度参数, 成桩体较碎石料强度减小超过 20%, 桩周土混入对桩体抗剪强度及应力变形特性均有较显著的劣化影响。结合初步研究结论, 提出了复合地基强度设计参数的修正建议。

关键词: 振冲碎石桩; 碎石料; 级配特性; 强度及应变; 试验研究

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0156-05

作者简介: 江泊洧(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程数值计算及粗粒土的试验研究。E-mail: jiangjw1023@163.com。

Experimental study on difference of shear strength between gravel materials and actual vibroflotation piles

JIANG Ji-wei¹, WANG Xiao-hua², RAO Xi-bao¹, DING Gao-jun², ZHANG Xue-yang², HUANG Shuai²

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The vibroflotation pile method is used to replace and compact the soft foundation with permeable materials such as gravel to form composite foundation, and in the past, the attention to shear strength of this kind composite foundation is little. Due to the compaction and replacement of gravel and soil around piles, difference is shown between gravel materials and actual vibroflotation gravel piles, regardless of particle composition or stress-strain characteristics. Based on field detection, sampling for vibroflotation gravel piles and gravel materials and indoor geotechnical tests to analyze the difference of physical and mechanical properties between vibroflotation gravel piles and gravel materials, the researches show: (1) The content of fine particles in actual piles is significantly higher than that of gravel materials, which mainly comes from the mixing (squeezing) of soft soil around piles during vibroflotation process; (2) The maximum dry density of piles is higher than that of gravel materials, which is directly related to the poor grading of gravel materials and mixing of fine particles; (3) Refer to actual compaction degree in the field, large-scale triaxial tests are carried out on gravel materials and two kinds of piles with different pile spacings, the strength of piles is about 10% lower than that of gravel materials, considering the difference in stress-strain characteristics, if the strength parameter is taken according to 5% axial strain, the strength of piles is more than 20% lower than that of gravel materials, and mixing of soil around piles has a significant deterioration effect on the shear strength and also the stress-strain characteristics of the piles. Based on the above initial conclusions, the modified suggestions for strength design parameters of composite foundation are proposed.

Key words: vibroflotation gravel pile; gravel soil; particle gradation; strength and strain; experimental study

0 引 言

振冲碎石桩是通过在软弱地基进行置换及挤密形成复合地基, 以达到提高地基整体受力性能的一种地

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979009); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(CKSF2019191/YT)

收稿日期: 2020-06-04

基处理方法。以往工程及研究中更多关注于复合地基承载力的改善, 实际上, 受后续附加荷载作用, 复合地基的抗剪强度也是一个重要的评价指标。

李进元^[1]结合水电工程软弱地层处理案例认为, 在复杂工程地质条件下可应用振冲碎石桩法进行大面积、大深度处理, 除有效提升地基承载力外, 还可显著提高地基抗剪强度; 陈健^[2]等以港珠澳大桥人工岛碎石桩工程为案例, 从监测和数值计算角度对碎石桩复合地基抗剪强度的改善进行了探讨; Rayamajhi^[3]还采用有限元方法分析了碎石桩压实度对复合地基整体抗剪强度提升的机理; 由于加固地层本身强度较低, 彭芝平^[4]等从振冲功率和施工工艺的角度, 开展了碎石桩排水加固效果的相关试验研究。

碎石桩-软土存在相互作用, 王德咏^[5]提出, 对于被加固的天然地基, 其自身细粒含量与最终复合地基处理效果有一定关系, 一方面对固结排水有一定影响, 另一方面桩周土与碎石也存在相互挤压和混合; 鉴于挤密成桩过程中, 碎石与软土混合作用难以把控, 采用土工合成材料对碎石进行约束的研究也相继开展, 欧阳芳^[6]和孙立强^[7]等研究了土工合成材料对碎石桩包裹约束后, 复合地基强度及承载力特性改善机理。

周建安^[8]认为碎石级配对于碎石桩的强度及变形具有一定影响, 并通过砾组和砂组两种理想状态开展了初步的试验研究; Siahann^[9]等也从理论上分析了碎石颗粒级配和碎石桩空间布置对于软土地基的加固机理。但实际上, 《建筑地基处理规范》^[10]和《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》^[11]中, 也都未对振冲碎石桩的碎石原料级配特性做过多要求。

综上, 据笔者施工现场观察及试验发现, 振冲碎石桩碎石原料与最终复合地基成桩体不论物理特性还是力学特性, 均存一定差异, 有必要对振冲法桩碎石原料与实际成桩体工程特性差异开展试验研究, 为工程设计参数修正提供必要的依据。

1 振冲桩体及碎石料物理特性试验

选取某消落带综合治理工程为研究案例, 该工程拟通过振冲碎石桩对粉质黏土夹砾石地基进行处理, 符合《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016) 的适用性要求。

拟在天然地基中按照桩间距 1.5 m 和 2.0 m 布置桩径 1.0 m 的振冲碎石桩。地基处理在消落带进行, 振冲碎石桩本身即为复合地基固结排水通道, 加之桩间土较软, 不论灌水法还是灌砂法都难以对实际成桩体进行现场密度试验及压实度试验。

对此, 提出了通过浮环下沉来对实际成桩体密度

进行检测的方法。利用挖掘机挖除桩头 3m 范围土层及桩体, 将加工好的正方形刚性浮环(边长略小于振冲桩内接正方形尺寸)置于大致找平的桩体表面后, 机械挖除外围桩间土后, 按压浮环实现下沉, 待桩体充满浮环, 人工找平表面, 并将成桩体装入编织袋。

图 1 所示为振冲碎石桩料场试样, 从表观上看, 料场碎石与实际成桩后的碎石体(图 2)存在较大差异, 成桩体混入的细颗粒物质较多。



图 1 振冲碎石桩碎石原料



图 2 振冲碎石桩散体状态

Fig. 2 Scattered state of vibroflotation gravel pile

通过室内试验对料场碎石和两种桩间距碎石成桩体的颗粒级配进行了测试, 如表 1 所示, 图 3 绘制了相应级配曲线; 同时, 将试样烘干后测试了实际干密度并开展了击实试验, 如表 2 所示, 可以看出:

(1) 对比料场碎石, 成桩体中混入了较多细粒成分, 粒径 20 mm 以下颗粒含量增加明显, 从粒组来看, 增加的主要为中砾和砂粒组, 累积增量超过总质量的 20%; 细粒组(小于 0.1 mm)绝对增量不足 1%, 这与振冲桩冲孔洗孔工艺及自身为排水通道有关;

(2) 1.5 m 桩间距 20 mm 以下颗粒含量较 2.0 m 桩间距小约 4.5%, 这与桩间距较密对桩周土的约束有关, 约束作用较强有助于避免细颗粒挤(混)入桩体。

(3) 两种桩间距成桩体现场干密度和压实度较为接近, 且最大干密度大于料场碎石, 一方面从级配特

表 1 研究试样颗粒级配统计
Table 1 Statistics of particle size distribution for research samples (%)

材料	粒径区间/mm											
	100~150	60~100	40~60	20~40	10~20	5~10	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	<0.1
料场碎石	31.44	40.75	17.72	6.31	0.98	0.43	0.24	0.22	0.16	0.54	0.90	0.29
桩间距 2.0 m 桩体	27.90	28.92	9.36	10.67	7.83	6.03	2.27	1.26	0.78	2.23	1.85	0.91
桩间距 1.5 m 桩体	30.54	30.15	10.09	10.60	5.54	3.82	1.59	1.32	0.61	1.92	2.99	0.84

征看，料场碎石不均匀系数 $C_u=2.25$ 、曲率系数 $C_c=1.07$ ，级配不良；另一方面，级配不良有利于桩周土挤（混）入桩体，细颗粒的充填引起成桩体干密度提高。

表 2 成桩材料及碎石料密度测试统计表
Table 2 Densities of vibroflotation gravel piles and gravel materials

材料	现场干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	密实度
2.0 m 间距桩体	2.026	2.249	0.901
1.5 m 间距桩体	2.031	2.264	0.897
料场碎石	—	2.130	—

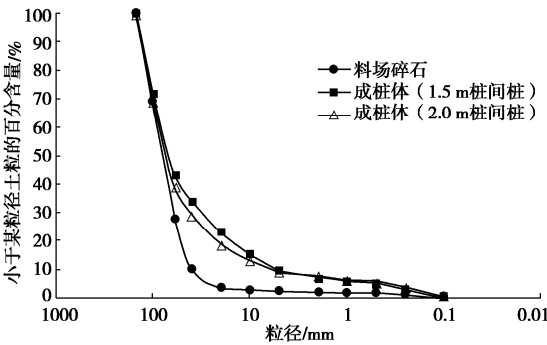


图 3 不同试样的颗粒级配曲线
Fig. 3 Gradation curves for different kinds of samples

2 振冲桩体及碎石料大型三轴试验

本工程复合地基形成后将进行填方堆载，用于对消落区的综合整治。因此复合地基抗剪强度对工程质量把控至关重要。以下通过大型三轴压缩试验对两种桩间距成桩体及料场碎石的强度及应变特性进行测试。

2.1 试验设备

试验设备为长江科学院 YLSZ30-3 型粗粒土三轴压缩仪，试样尺寸 $\Phi 300 \times H600$ mm，最大围压 3.0 MPa，最大轴向应力 21 MPa，最大行程 300 mm，如图 4 所示，试验仪主体包括刚性反力架，轴向油压千斤顶、三轴压缩室以及稳压系统（采用液氮加压的方式稳定微调试验过程中的围压）。

2.2 试验方案

对桩间距 2.0 m 和 1.5 m 两种桩体料分别试验；同时，从平行对比角度，对料场碎石按照相同压实度 0.90 确定试验干密度。通过试验获取并对比料场碎石

与成桩体的强度及变形特性差异。

考虑到碎石料最大粒径为 150 mm，为保证试验成果可靠性，采用相似级配法进行缩尺后开展试验。

参照相似级配法，对试样按 0.4 倍整体缩尺，可满足试样制备最大粒径 6 cm 的要求，同时可保证试样制备密度的一致性。



图 4 大型三轴压缩试验仪

Fig. 4 Large-scale triaxial compression apparatus

桩间距 2.0 m 和 1.5 m 成桩体试验干密度分别为 2.026，2.031 g/cm^3 ；料场碎石为 1.92 g/cm^3 。

复合地基预估最终垂直附加荷载不大于 0.8 MPa，设计试验 4 级围压分别为 0.1，0.2，0.3，0.4 MPa，在饱和固结排水模式下开展试验。

2.3 试验成果

对碎石原料及两种桩间距成桩体的抗剪强度参数进行统计如表 3。另绘制桩间距 1.5 m 成桩体和碎石料的应变关系曲线见图 5，6，综合分析可知：

（1）相同压实度，两种桩间距成桩体内摩擦角比料场碎石低约 10%，这与细颗粒混（挤）入桩体密切相关，骨架粗颗粒之间的受力及传递关系发生了改变。

（2）据黏聚力指标，三者差异及规律性不明显，在 36~52 kPa，但其机理存在一定差异。从应变曲线来看，碎石料初始刚度显著大于成桩料，在轴应变约 5%即达到峰值应力的 95%以上，成桩料在围压较大条件下（0.3，0.4 MPa）呈应变硬化特性，而碎石料则呈弹性-延性变形特性；另据体变曲线，碎石料在低围压下剪胀性强于成桩体（应为粗颗粒骨架旋转效应），而在高围压下剪缩亦强于成桩体（应为颗粒破碎问题，与级配有关），粗颗粒骨架对于碎石料变形的控制性显

著大于成桩体。对于碎石料, 黏聚力主要反映了颗粒间的机械咬合, 而对成桩体则主要反映了粗细颗粒整体结构协同受力的黏结效果。

(3) 参照《地基处理手册》^[12]中的 Priebe 方法, 按碎石原料及两种桩间距成桩体的试验强度, 分别计算复合地层的抗剪强度指标, 桩周软土强度参数为内摩擦角 $\varphi=10^{\circ}$ 、黏聚力 $c=13\text{ kPa}$, 桩土应力比取 2, 计算得到复合地基抗剪强度参数如表 4 所示, 1.5 m 和 2.0 m 成桩体计算得到的复合地基内摩擦角分别较碎石原料计算值低约 15%和约 13%。

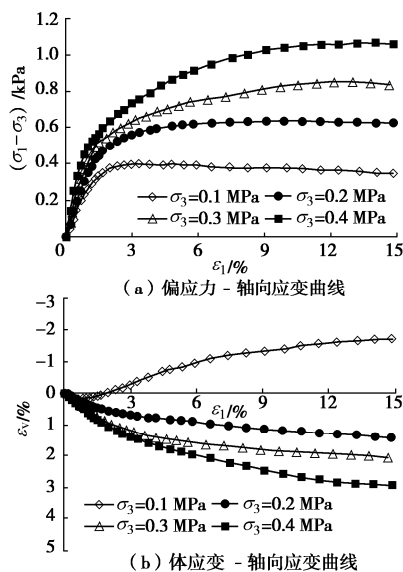


图 5 桩间距 1.5 m 成桩体的应力应变关系曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of vibroflotation gravel pile with 1.5 m spacing

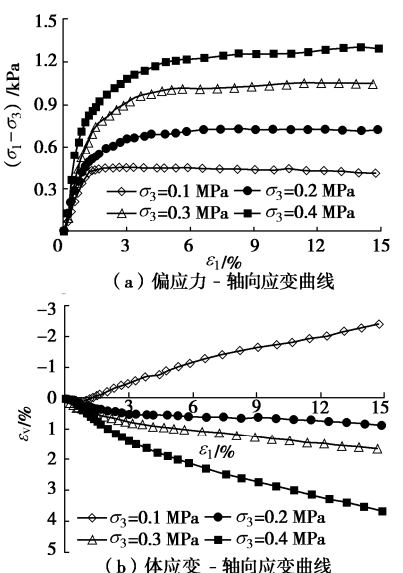


图 6 碎石料的应力应变关系曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of gravel materials

(4) 碎石料与成桩体在偏应力发挥过程上差异较大, 对水平变形控制要求较高的复合地基, 按峰值应力确定强度存在一定不合理性。以 5%轴应变为例,

按此应变量对应的偏应力绘制碎石料与桩间距 1.5 m 成桩体的莫尔圆及强度包络线, 成桩体摩擦角较碎石料低 22% (图 7), 显著高于按照峰值偏应力确定的强度指标。

表 3 大型三轴压缩试验成果表

试样名称	干密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗剪强度指标	
		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
桩间距 2.0 m 桩体	2.026	36	32.8
桩间距 1.5 m 桩体	2.031	52	31.7
料场碎石	1.92	42	36.2

表 4 复合地基抗剪强度计算值对比

材料	1.5 m 间距复合地基		2.0 m 间距复合地基	
	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
成桩体	26.49	7.76	19.42	10.05
碎石原料	31.17	7.76	22.66	10.05

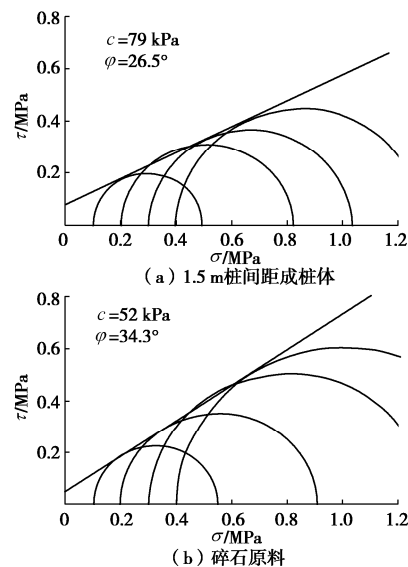


图 7 5%轴向应变对应的莫尔圆及强度包络线
Fig. 7 Mohr's circle and linear fitting curves ($\epsilon_1=5\%$)

3 结 论

本文以振冲桩碎石原料与实际成桩体抗剪强度差异为研究主题, 设置物理力学对比试验, 初步揭示了碎石原料与实际成桩体抗剪强度差异的原因及机理, 得到以下主要结论:

- (1) 对成桩体及料场碎石级配对比分析后认为, 成桩体中混有较多桩周细粒土成分, 这与振冲桩冲孔工艺、泥浆循环及自身为排水通道有关, 施工过程中桩周土挤(混)入桩体的效应较为明显。
- (2) 据现场密度检测和室内重型击实试验, 选取的 1.5 m 和 2.0 m 两种桩间距成桩体现场干密度和压实度较为接近, 且最大干密度大于料场碎石, 碎石料级配不良是振冲过程中桩周土挤(混)入桩体的重要

原因。

(3) 碎石料初始刚度显著大于成桩体, 其在应变 5% 左右偏应力接近峰值, 而后呈现较好的延性; 而成桩体由于细颗粒混入, 呈较显著应变硬化特性, 其导致应力峰值发挥对应轴应变较大。按峰值偏应力计算强度参数时, 成桩体较碎石料低约 10%; 而若按 5% 轴应变对应偏应力计算强度参数, 则成桩体较碎石料强度降低超过 20%。

(4) 分别选取碎石料和成桩体强度计算复合地基等效抗剪强度, 1.5 m 和 2.0 m 桩间距条件下成桩料强度计算得到的复合地基等效内摩擦角, 分别较碎石料计算的内摩擦角低约 15% 和约 13%。

综上, 考虑施工工艺因素, 在确定碎石桩抗剪强度参数时, 可从料场碎石取样, 按桩体现场检测压实度制样并测试其强度参数, 结合本文初步研究结论, 建议按 10% 进行折减, 有条件时可直接现场取成桩料测试后确定; 在计算复合地基等效抗剪强度时, 应选取修正后的成桩体强度, 按照规范法进行计算; 另外, 对于部分有水平变形控制要求的碎石桩复合地基, 考虑到碎石料与实际成桩体物理特性差异, 两者在偏应力发挥过程上存在不同, 折减系数可按具体控制要求, 做适当提高。

此外, 据本文初步研究, 碎石原料级配对于成桩体质量具有较大影响, 而目前技术规范对振冲桩碎石原料级配的约束或规定相对缺失, 有必要开展进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 李进元. 振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2968 - 2976. (LI Jin-yuan. Application of foundation treatment with vibro-replacement stone piles to yinping hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2968 - 2976. (in Chinese))
- [2] 陈健, 苏岩松, 张杰, 等. 碎石桩软土复合地基整体抗剪强度研究[J]. 水运工程, 2016(5): 146 - 148, 161. (CHEN Jian, SU Yan-song, ZHANG Jie, et al. Overall shear strength of stone column-soil composite ground[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(5): 146 - 148, 161. (in Chinese))
- [3] RAYAMAJHI D, ASHFORD S A, BOULANGER R W, et al. Dense granular columns in liquefiable ground: I shear reinforcement and cyclic stress ratio reduction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016: 04016023.
- [4] 彭芝平, 杨军, 陈耀光, 等. 饱和盐渍土碎石排水桩加强夯试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 136 - 141. (PENG Zhi-ping, YANG Jun, CHEN Yao-guang, et al. Experimental study on ground improvement of saturated saline soil with dynamic consolidation and drainage stone columns [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 136 - 141. (in Chinese))
- [5] 王德咏, 梁小丛, 牛犇. 振冲密实法处理吹填地基的两个关键技术问题[J]. 水运工程, 2019(6): 163 - 166. (WANG De-yong, LIANG Xiao-cong, NIU Ben, et al. Two key technical issues of vibroflotation compaction for hydraulic-filled foundation treatment[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(6): 163 - 166. (in Chinese))
- [6] 欧阳芳. 包裹碎石桩复合地基静动力特性及其设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (OU Yang-fang. Studies on the Behavior and Design Method for Geosynthetic Encased Stone Columns Composite Ground Under Static and Dynamic Conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [7] 孙立强, 邵丹丹, 冯守中, 等. 土工合成材料约束碎石桩承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 29 - 32. (SUN Li-qiang, SHAO Dan-dan, FENG Shou-zhong, et al. Bearing capacity of geosynthetics-enclosed stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 29 - 32. (in Chinese))
- [8] 周建安. 碎石桩模型三轴试验及其成果应用分析[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(2): 40 - 45. (ZHOU Jian-an. Analysis and application of triaxial test results of crushed-stone pile model[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(2): 40 - 45. (in Chinese))
- [9] SIAHAAN F, INDRARATNA B, NGO N T, et al. Influence of particle gradation and shape on the performance of stone columns in soft clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(6): 20160234.
- [10] 建筑地基处理规范: JGJ 79—2012[S]. 2012. (Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. 2011. (in Chinese))
- [11] 水电水利工程振冲法地基处理技术规范: DL/T 5214—2016 [S]. 2016. (Technical specification for vibroflotation ground treatment of hydroelectric and water resources projects: DL/T 5214—2016[S]. 2011. (in Chinese))
- [12] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Foundation Treatment Manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)