

振冲碎石桩抗剪强度特性综合试验研究

夏海¹, 丁刚², 熊诗湖^{3*}

(1. 深圳市原水有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010;

3. 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)

摘要: 某三峡库岸整治工程中, 针对库水冲积形成的淤泥质粉质黏土库岸, 采用振冲碎石桩作为阻滑桩。碎石桩抗剪强度参数是施工设计与库岸稳定分析所需的基础参数。为研究碎石桩抗剪强度特性, 确定其抗剪强度参数, 开展了桩体大型原位直剪、碎石桩填料大型室内叠环剪和三轴压缩试验。不同试验方法的内摩擦角范围值为 $31.4^{\circ}\sim 33.0^{\circ}$, 偏差系数为0.02, 黏聚力范围值为17~73 kPa, 偏差系数为0.69。探讨了不同试验方法的工程适宜性, 认为剪切面下盘桩体掩埋于地基土的原位直剪试验条件与碎石桩工程条件基本一致。按不同方法试验值的最小值提出振冲碎石桩抗剪强度参数试验建议值: 内摩擦角 $\varphi=31.4^{\circ}$ 、黏聚力 $c=17$ kPa。

关键词: 原位测试; 地基; 振冲碎石桩; 抗剪强度参数; 叠环剪; 三轴压缩试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0589-06

Comprehensive experimental study on the shear strength characteristics of vibroflotation gravel pile

XIA Hai¹, DING Gang², XIONG Shihu^{3*}

(1. Shenzhen Raw Water Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. Changjiang Design Group Co., Ltd., Wuhan 430010, Hubei, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources,

Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: In a remediation project of Three Gorges reservoir bank, vibroflotation gravel piles are used as anti-sliding piles for the mucky silty clay bank formed by reservoir water alluvial. The shear strength parameters of the gravel piles are basic parameters for construction design and bank stability analysis. In order to study the shear strength characteristics of the piles and determine its shear strength parameters, large-scale in-situ direct shear test of piles, large-scale laboratory frame-stacked ring shear test and triaxial compression test on the gravel pile fillers were carried out. For the internal friction angle of different test methods, the value ranges from 31.4° to 33.0° , and the deviation coefficient is 0.02. For the cohesion of different test methods, the value ranges from 17 kPa to 73 kPa, and the deviation coefficient is 0.69. The engineering suitability of different test methods was discussed and it was concluded that the conditions of in-situ direct shear test with the pile section below the shear plane buried in the foundation soil are basically consistent with the engineering conditions of the gravel piles. According to the minimum values of all kinds of tests, the recommended values of shear strength parameters of vibroflotation gravel pile are put forwardd as follows: The internal friction angle is 31.4° and the cohesion is 17 kPa.

Key words: in-situ test; foundation; vibroflotation gravel pile; shear strength parameters; frame-stacked ring shear test; tri-axial compression test

收稿日期: 2023-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277186)。

作者简介: 夏海(1991—), 男, 湖北武汉人, 本科, 工程师, 从事水利水电工程管理工作。E-mail: 924840660@qq.com。

*通信作者: 熊诗湖(1967—), 男, 湖北武汉人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩土力学试验研究。E-mail: 719475395@qq.com。

0 引言

振冲碎石桩是在软土地基造孔后回填碎石料并经振密形成的桩体,与桩间土形成复合地基,不仅可以提高地基的承载力、减少地基的沉降量和差异沉降量,也可提高地基的抗滑稳定性。

碎石桩复合地基抗剪强度参数是地基抗滑稳定分析的基础参数,其确定方法主要有2种,其一为复合地基直剪试验,包括原位直剪^[1-2]和缩尺模型直剪^[3]。由于复合地基直剪试验耗时费力,且桩体与桩间土的剪切变形协调性对于强度参数的影响难以评估,该类试验实施较少。其二是基于桩体、桩间土的抗剪强度参数,以及桩土分荷比或应力集中系数,采用解析式计算复合地基抗剪强度参数^[4-6],是行业规范的推荐方法,在工程实践中被广泛采用^[7-10]。由于桩体的抗剪强度显著高于桩间土,碎石桩抗剪强度参数的取值是该方法可靠性的关键。王盛源等^[1]、陈新华等^[2]、樊广利等^[9]、陈健等^[10]分别开展了碎石桩桩体原位直剪试验,确定了碎石桩抗剪强度参数。江洎洎等^[11]针对碎石料实施室内大型三轴试验,分析振冲桩实际成桩体与碎石原料的抗剪强度差异。

碎石桩填料为人工备料,与天然状态碎石土相比,具有以下特征:(1)颗粒组成、密实度稳定;(2)原状样与重塑样均为散体状,无结构差异;(3)细粒含量低,抗剪强度受含水率影响小。因此,不同方法的试样性状基本一致,试验值具有较高可比性,通过对比分析多种方法的试验值确定碎石桩的抗剪强度参数将提高参数的可靠性,但目前鲜见此类研究成果。

本文综合采用碎石桩桩体大型原位直剪、碎石桩填料大型室内叠环剪和室内三轴压缩试验研究振冲碎石桩的抗剪强度特性,对比分析不同方法试验值的差异,在此基础上,考虑试验方法的工程适宜性,提出了振冲碎石桩抗剪强度参数的试验建议值。

1 地基与碎石桩

工程区地基土为三峡水库蓄水后在库岸冲积形成的淤泥质粉质黏土,褐灰-浅灰色,流塑-软塑状,干密度为 1.88 g/cm^3 ,对应密实度为0.88。

振冲碎石桩直径为1 m,桩间距为1.5 m。填料为人工碎石,其原岩主要为砂岩和少量灰岩,最大粒径为15 cm。桩体材料干密度为 2.30 g/cm^3 ,对应

密实度为0.90。

振冲碎石桩纵剖面见图1,桩体填料颗粒级配曲线见图2。



图1 振冲碎石桩纵剖面

Fig. 1 Longitudinal section of vibroflotation gravel pile

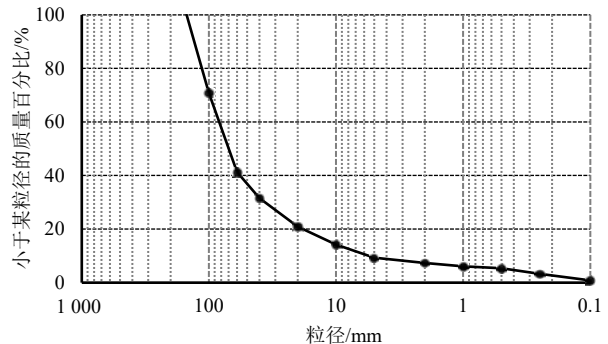


图2 桩体填料颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of pile filling material

2 桩体原位直剪试验

共开展2组桩体原位直剪试验,编号为S1和S2。S1组共5个试样,剪切面下盘桩体无钢模。S2组共21个试样(工程检测时分为5组,考虑试验条件相同,在此归并为1组),剪切面下盘桩体套钢模。

2.1 试验流程

碎石桩施工完成15 d后,挖除表层深2 m范围的桩体和桩间土,形成试验坑。在坑底开挖集水井并抽水,保持试验坑内不积水。

将方柱状钢模置于试验桩端部,套住桩体下压钢模使其嵌入地基,然后清除钢模周围土体形成试样。钢模横截面为 $70\text{ cm}\times 70\text{ cm}$ 。S1组试验桩外套1个钢模,高40 cm,试验剪切面位于钢模下缘,剪切面下盘桩体保持掩埋于地基土状态。S2组试验桩外套2个钢模,钢模上下叠放,高度分别为40 cm和20 cm,剪切面位于上下钢模中缝,缝宽3.8~5.0 cm(碎石最大粒径的 $1/4\sim 1/3$),在下部钢模相

对剪切方向的侧边安装钢支撑, 阻止其沿剪切方向的位移。

搭建堆载平台作为正压力的反力体, 以堆载平台支墩作为剪力的反力体。采用液压千斤顶施加荷载, 大量程百分表测量位移。

原位直剪试验设备安装图见图 3。

S1、S2 组最大正压力分别为 490 kPa、582 kPa (最大工程荷载下地基应力为 600 kPa)。正压力维持 1 h 后施加剪力。剪力分级施加, 每级稳定时间为 10 min。剪力无法维持或剪切位移达到剪切面边长的 1/10 (7 cm) 时认为试样破坏, 结束试验。

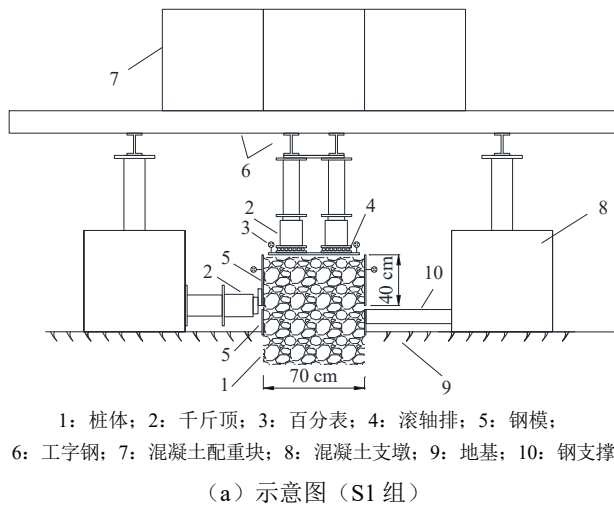


图 3 原位直剪试验设备安装图

Fig. 3 Equipment installation of in-situ direct shear test

2.2 剪切变形特性与强度参数

原位直剪试验剪应力与剪切位移关系曲线见图 4。

剪切过程中碎石颗粒滑移、翻滚形成剪切位移, 呈延性破坏特征。随着剪应力的增加, 剪切刚度降低、剪应变加速增长。剪应变较大, 峰值剪应力下的剪应变达到或超过 0.1。破坏后无明显剪应力跌落。

剪应力与剪切位移关系曲线出现跳跃, 反映了大粒径碎石造成的卡顿和爬坡效应。

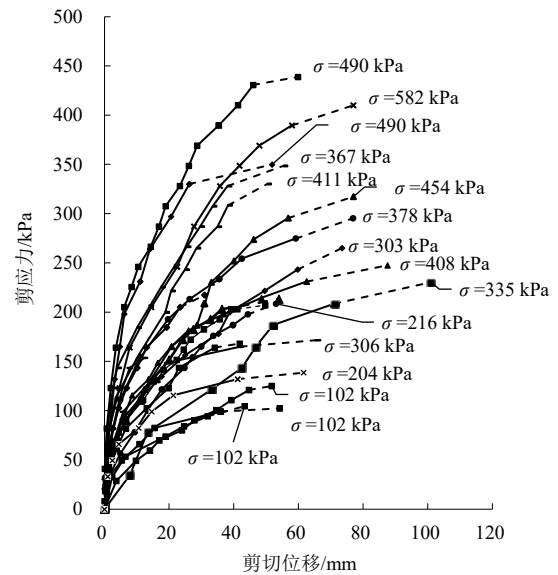
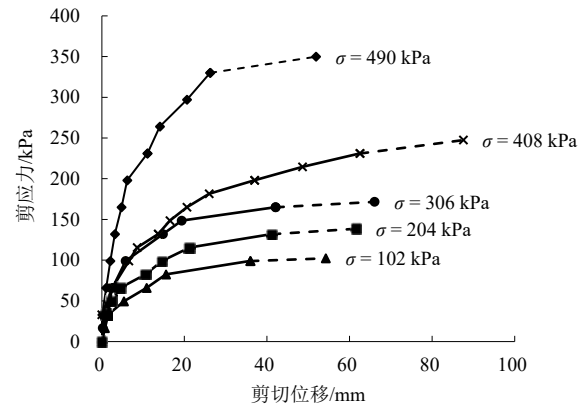


图 4 原位直剪试验剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between shear stress and shear displacement of in-situ direct shear test

试验结束后翻开上盘钢模时, 碎石散落、堆积, 未发现碎石破碎, 无清晰破坏面。

以剪应变达到 0.1 时的剪应力作为抗剪强度, 原位直剪试验抗剪强度与正压力关系曲线见图 5。S1 组内摩擦角 $\varphi=31.4^\circ$ 、黏聚力 $c=18$ kPa, S2 组 $\varphi=32.6^\circ$ 、 $c=65$ kPa。S1 组的 φ 、 c 值比 S2 组分别低 3.7%、72.3%。

深厚软土地基中的碎石桩随地基发生滑移破坏时, 水平位移较大, 且沿深度的分布梯度平缓, 难以形成明显的剪切破坏面。剪切面下盘桩体掩埋于地基土的原位直剪试验具有以下特征: 桩体剪切位移约束与工程状态相似, 剪切过程中碎石颗粒易滚动且趋于松散, 剪切位移较大。显然, 其试验条件与碎石桩工程条件较一致。

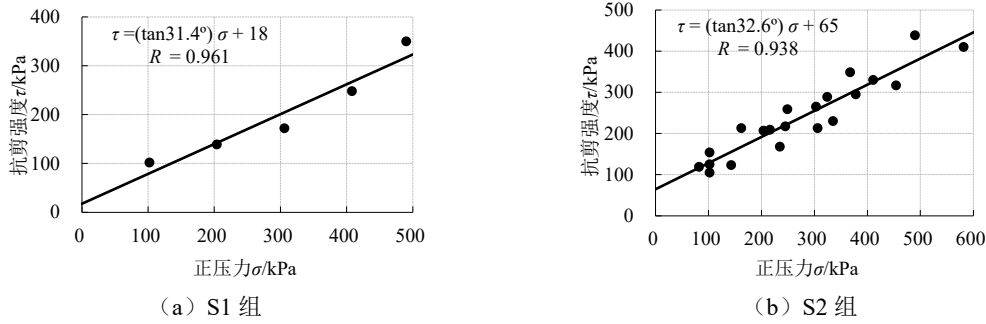


图5 原位直剪试验抗剪强度与正压力关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between shear strength and normal pressure of in-situ direct shear test

3 叠环剪试验

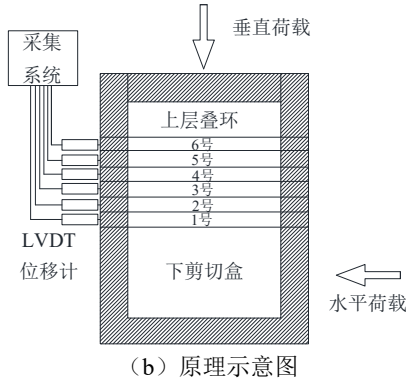
开展 1 组（8 个试样）碎石桩填料室内叠环剪试验。

3.1 试验条件

叠环剪试验机的剪切盒中部由 7 层高 3 cm 的刚性叠环构成，叠环之间采用滚轴接触以降低叠环之间的摩擦，剪切盒侧壁安装滚珠导向板，控制剪切盒的切向变形方向。每个叠环均设置有独立的位移传感器。试验机最大轴向荷载为 1 000 kN，最大水平推力为 1 000 kN，最大法向行程为 120 mm，最大水平行程为 120 mm。试样长 60 cm、宽 60 cm、高 60 cm，允许最大粒径为 6 cm。叠环剪试验机见图 6。



(a) 实体



(b) 原理示意图

图6 叠环剪试验机

Fig. 6 Frame-stacked ring shear test machine

采用相似级配法制备试样。考虑桩体填料最大粒径为 15 cm，而试验机允许的最大粒径为 6 cm，按 0.4

的缩尺比例配备碎石料。试样密实度与桩体填料相同。

最大正压力为 800 kPa。采用饱和固结快剪，应变控制加载，剪切速率为 3 mm/min。

3.2 变形特性与强度参数

叠环剪试验剪应变曲线见图 7。剪切变形显现与原位直剪相似的延性破坏特征，达到峰值剪应力时的剪应变平均值为 0.11，但剪应变曲线较原位直剪平滑，其原因在于：叠环剪切形成厚 21 cm 的剪切带，大粒径碎石的卡顿、爬坡效应较小。

以峰值剪应力作为抗剪强度，叠环剪试验抗剪强度与正压力关系曲线见图 8。内摩擦角 $\varphi=33.0^\circ$ ，黏聚力 $c=17$ kPa。

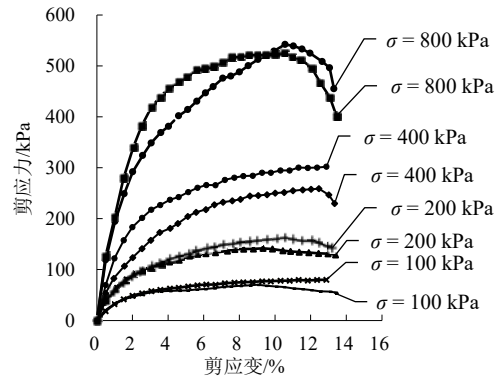


图7 叠环剪试验剪应变曲线

Fig. 7 Shear strain curves of frame-stacked ring shear test

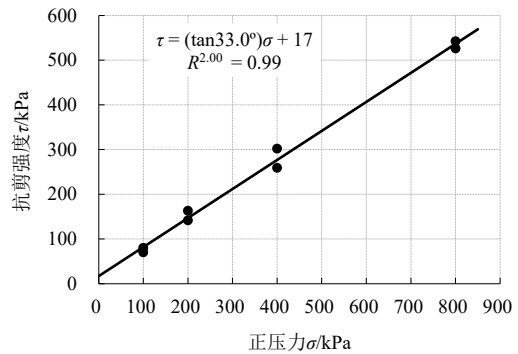


图8 叠环剪试验抗剪强度与正压力关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between shear strength and normal pressure of frame-stacked ring shear test

4 三轴试验

开展1组(8个试样)碎石桩填料的三轴压缩试验。

4.1 试验条件

试样直径为 30 cm、高为 60 cm, 颗粒级配、密实度与叠环剪试样相同。

最大围压为 400 kPa。采用饱和固结排水模式, 轴应变速率为 0.45 mm/min。

4.2 变形特性与强度参数

三轴压缩试验轴应变曲线见图 9。轴应变呈现延性变形特征, 达到峰值轴应力时的轴应变平均值为 0.08。

基于峰值轴向应力绘制莫尔圆及强度包络线见图 10。内摩擦角 $\varphi=32.3^\circ$, 黏聚力 $c=73$ kPa。

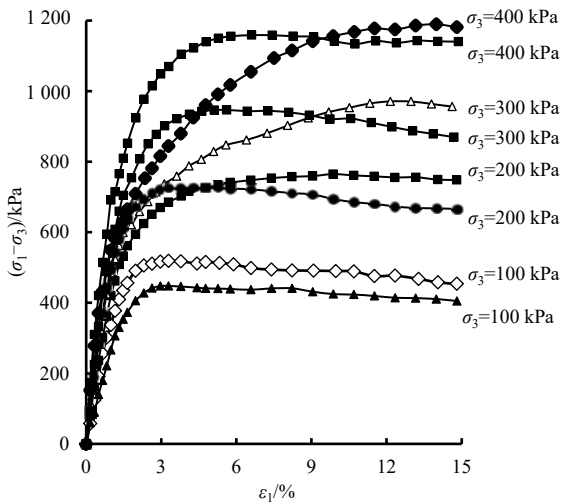


图 9 三轴压缩试验轴应变曲线

Fig. 9 Axial strain curves of triaxial compression test

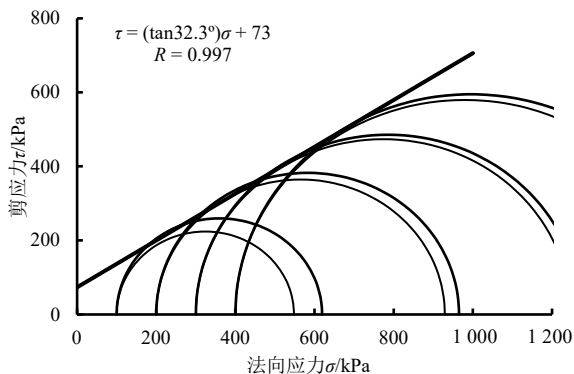


图 10 三轴压缩试验莫尔圆及强度包络线

Fig. 10 Mohr's circles and strength envelope curve of triaxial compression test

5 抗剪强度参数试验值对比与建议值

不同试验方法的抗剪强度参数试验值见表 1。

表 1 抗剪强度参数试验值

Table 1 Test values of shear strength parameters

试验方法	抗剪强度参数		拟合系数
	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	
原位直剪 (下盘掩埋于地基土)	31.4	18	0.961
原位直剪 (下盘套钢模)	32.6	65	0.938
叠环剪	33.0	17	0.997
三轴压缩	32.3	73	0.995

由表 1 可见:

(1)各方法的强度参数拟合相关系数为0.938~0.997, 说明各组试样性状一致性较高。

(2)叠环剪、下盘剪切位移刚性约束的原位直剪、三轴压缩、下盘剪切位移不施加约束的原位直剪的内摩擦角依次减小, 但差异较小, 偏差系数为 0.02。

(3)黏聚力较离散, 偏差系数为 0.69。剪切面下盘桩体套钢模(下盘剪切位移刚性约束)的原位直剪、三轴压缩试验的黏聚力显著大于叠环剪、剪切面下盘桩体无钢模(下盘剪切位移无约束)的原位直剪, 其原因为: 碎石填料无黏结, 其黏聚力源于颗粒间的镶嵌效应, 而前 2 种试验的碎石颗粒受到的约束强于后者, 其镶嵌效应更显著。

(4)下盘桩体掩埋于地基土的原位直剪试验条件与碎石桩工程条件相似, 试验值较可靠, 且对比不同方法的试验值, 其内摩擦角为最小值、黏聚力接近最小值, 据此, 并为提高参数可靠度, 按不同方法试验值的最小值提出振冲碎石桩抗剪强度参数试验建议值为: 内摩擦角 $\varphi=31.4^\circ$ 、黏聚力 $c=17$ kPa。

6 结论

针对振冲碎石桩桩体开展大型原位直剪试验, 针对桩体碎石填料开展室内大型叠环剪和三轴压缩试验, 对比分析了不同方法的试验成果, 结论如下:

(1)振冲碎石桩桩体在原位直剪条件下, 碎石桩填料在叠环剪、三轴压缩条件下均呈延性破坏, 剪应变或轴应变较大, 剪切刚度随剪应力增加而降低。

(2)不同方法的内摩擦角试验值差异较小, 偏差系数为 0.02, 黏聚力试验值较离散, 偏差系数为 0.69, 下盘剪切位移刚性约束的原位直剪、三轴压

缩试验的黏聚力显著大于叠环剪、下盘桩体掩埋于地基土的原位直剪。

(3) 下盘桩体掩埋于地基土的原位直剪试验条件与碎石桩工程条件相似,其试验值较可靠。

(4) 按不同方法试验值的最小值提出振冲碎石桩抗剪强度参数试验建议值为:内摩擦角 $\varphi=31.4^\circ$ 、黏聚力 $c=17\text{ kPa}$ 。

参考文献

- [1] 王盛源, 关锦荷, 王保田. 大粒径碎石桩现场大型综合试验[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 43-48.
WANG Shengyuan, GUAN Jinhe, WANG Baotian. The comprehensive test in-situ of large-grain diameter vibro replacement stone column[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 43-48.
- [2] 陈新华, 肖峰. 大粒径碎石桩快速加固软土地基试验与研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(11): 62-65.
CHEN Xinhua, XIAO Feng. Test study on large-sized gravel piles to improve soft soil foundations[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(11): 62-65.
- [3] 王家辉, 饶锡保, 江泊洳, 等. 振冲碎石桩复合地基抗剪机制的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1095-1103.
WANG Jiahui, RAO Xibao, JIANG Jiwei, et al. Model experimental study of the shear mechanism of vibroflotation stone column composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1095-1103.
- [4] 国家能源局. 水电水利工程振冲法地基处理技术规范: DL/T 5214—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Technical Specification for Vibroflotation Ground Treatment of Hydroelectric and Water Resources Projects: DL/T 5214—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for Foundation Design on Port and Waterway Engineering: JTS 147 — 2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [6] PRIEBE H J. The design of vibro replacement[J]. Ground Engineering, 1995, 28(10): 31-37.
- [7] 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 Jinyuan. 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.
- [8] 张伟, 任占杰, 李晓力, 等. 丰宁抽水蓄能电站拦沙坝坝基振冲碎石桩加固技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 1-8.
ZHANG Wei, REN Zhanjie, LI Xiaoli, et al. Vibroflotation gravel pile reinforcement technology for retaining dam foundation of Fengning pumped storage power station[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(1): 1-8.
- [9] 樊广利, 辛宗成. 振冲碎石桩及桩间土现场原位大型剪切试验研究[J]. 水电站设计, 2009, 25(4): 113-115.
FAN Guangli, XIN Zongcheng. In-situ large shear test of vibroflotation crushed stone piles and soil between piles[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, 25(4): 113-115.
- [10] 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 Yansong, ZHANG Jie, et al. Overall shear strength of stone column—soil composite ground[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(5): 146-148, 161.
- [11] 江泊洳, 王小华, 饶锡保, 等. 振冲桩法碎石原料与实际成桩体抗剪强度差异试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 156-160.
JIANG Jiwei, WANG Xiaohua, RAO Xibao, et al. Experimental study on difference of shear strength between gravel materials and actual vibroflotation piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 156-160.