

振冲碎石桩成桩过程模拟和桩径预测研究

魏永新¹, 庾晓军¹, 曹瑞琅², 何瑞良¹, 赵宇飞², 张强²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 中国水利水电科学研究院
流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘要: 振冲碎石桩是应对软弱地层的复合地基处理手段, 施工质量至关重要, 碎石桩径是成桩过程控制的核心指标。在碎石桩和土体宏观和细观参数标定基础上, 梳理振冲碎石桩成桩工艺, 基于离散单元法开展了振冲碎石桩成孔清孔、填料、振冲挤密等主要成桩过程模拟, 并进行桩径预测研究。结果表明: 颗粒流离散元能够较好地模拟振冲过程中碎石和土体的相互流动, 模型反映出了碎石向土体的过渡界面; 留振过程中, 碎石和加密段周围土体孔隙率逐渐减小, 表明振冲碎石桩对桩周土体有明显的挤密作用; 离散单元法能够模拟出碎石与土体的相互作用, 绘制的桩径和桩形表现出波动性, 与常规公式计算方法相比更接近工程实际。

关键词: 振冲碎石桩; 成桩过程; 桩径; 离散单元法; 地基处理

中图分类号: TV553; TU753.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0176-05

Forming process simulation and diameter prediction of vibroflotation gravel piles

WEI Yongxin¹, TUO Xiaojun¹, CAO Ruilang², HE Ruiliang¹, ZHAO Yufei², ZHANG Qiang²

(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. State key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China

Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: As an economic and practical foundation treatment method, vibroflotation gravel piles are specially designed for weak strata, the quality control of which are of great significance, and the diameter of the gravel pile is one of the core elements of the control of pile forming process. Based on the calibration of macroscopic and mesoscopic parameters of the gravel pile and soil, the pile forming process of the vibroflotation gravel pile is analyzed and the main pile forming processes, such as hole forming and cleaning, filling and vibroflotation compaction are simulated using the discrete element method. In the meantime, the pile diameter prediction is carried out. The results show that the particle flow discrete element can simulate the flow between the gravel and soil in the process of vibroflotation, and the model reflects the actual transition interface between gravel and soil; in the process of retaining vibration, the porosity of the soil around the gravel and densified section decreases gradually, indicating that the vibroflotation gravel pile has an obvious compaction effect on the soil around the pile; because the discrete element method can simulate the interaction between the gravel and soil, the calculated fluctuation of pile diameter and pile shape is more reasonable than that of the calculation method of conventional formulas.

Key words: vibroflotation gravel pile; pile forming process; pile diameter; discrete element method; foundation treatment

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079150)

作者简介: 魏永新(1973-), 男, 湖南新化人, 学士, 教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程。

通讯作者: 曹瑞琅(1986-), 男, 河南周口人, 博士, 高级工程师, 研究方向为岩土力学与工程。

1 研究背景

振冲碎石桩是一种在工程实践中逐渐发展起来的地基处理技术,因其施工简单、工期短、性价比高,目前已经被成功应用于水利水电^[1]、工民建^[2]及公路^[3]等工程各类软弱地基处理中。振冲碎石桩施工时,通常利用起重设备吊起振冲器,采用剧烈的水平振动和高压水冲贯指定地层,形成预定直径钻孔,并分段填入碎石;然后利用振冲器水平向振挤冲击周边土体和填料^[4-5],分层形成密实的振冲桩体,其施工场景如图1所示。

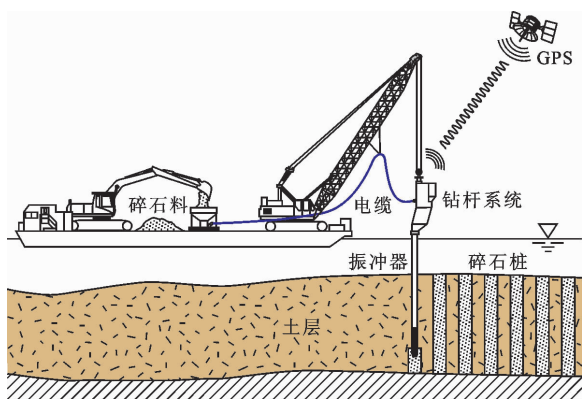


图1 超深振冲碎石桩机施工场景示意图

随着工程应用推广和研究的深入,岩土工程界对振冲碎石桩的认知逐渐提高。以作用机理^[6]为视角,现有研究成果提出的加固效果可归纳为4个方面:(1)挤密作用。桩间土体受到振冲桩的全方位挤压,从而提高了土体强度^[7-9];(2)置换作用。缘于利用强度较高的碎石置换了软弱土体^[10],地层平均强度增大;(3)排水作用。桩体形成后加快了区域地层的渗流固结^[11-14],使桩间土体强度相应提高;(4)垫层作用。振冲碎石桩层有效分散了上部荷载^[15],增强了地层的整体性。而且,振冲桩加固效果并非单一作用,而是多种作用的共同效应^[16]。

国内外学者采用理论分析、室内试验、数值模拟和深度学习等方法对振冲碎石桩基础承载性能开展了长期研究,提出了振冲桩承载力的解析式和数学模型。典型成果有:提出复合基础承载力计算的修正方法^[17]、建立承载力非线性分析模型^[18]、通过桩土平衡方程建立桩周土体附加应力和沉降表达式^[19]。此外,采用可靠度分析方法^[20]演算承载力也逐渐受到重视。与此同时,近几年工程人员越来越关注碎石桩施工质量,主要涉及桩体密实度、桩间土力学参数、施工过程监测^[21]及桩直径等。

在已有的研究中,通常假定振冲碎石桩的桩体是接近均匀的,而工程实践表明,碎石桩体的形态具有波动性^[22],但以往解析和经验计算中无法考虑该因素。若不能实现振冲桩承载力与其成桩过程密切关联,将难以反映成桩过程全貌和桩径随深度分布。为此,本文采用离散单元法 PFC2D 软件 (partical flow code in 2 demensions),考虑了碎石桩和土体的相互作用,开展振冲碎石桩成桩过程模拟,并提出了通过数值方法预测桩径的思路。

2 碎石桩和土体宏细观参数标定

2.1 碎石桩体颗粒几何尺寸

利用 PFC2D 中的颗粒流程序模拟碎石桩体需要关注碎石形状的随机性。为此,采用随机多边形生成器进行碎石模型生成(图2),多边形边数设置为4~6个。

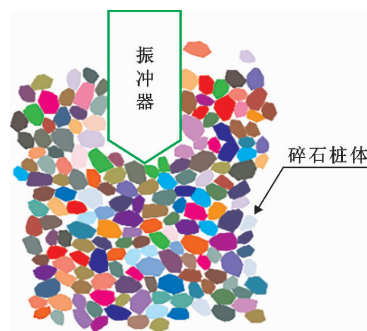


图2 振冲碎石桩体颗粒模型生成

碎石颗粒要求具有较好的级配,直径和尺寸符合:(1)20~40 mm 占比约为40%;(2)40~80 mm 占比约为60%;(3)小于5 mm 粒径的颗粒含量不超过10%,泥沙含量不大于5%。为此,采用 Weibull 概率分布,构造出直径 $d \in [d_{\min}, d_{\max}]$,颗粒累计质量百分比 $M(d)$ 符合下式:

$$M(d) = \frac{\int_0^d f(x)x^2 dx - \int_0^{d_{\min}} f(x)x^2 dx}{\int_0^{d_{\max}} f(x)x^2 dx - \int_0^{d_{\min}} f(x)x^2 dx} \quad (1)$$

式中: x 为颗粒直径,mm; $d_{\min}$ 为最小粒径,mm; $d_{\max}$ 为最大粒径,mm。

2.2 土体宏细观参数标定

根据土样室内试验获取的土体物理力学参数见表1。采用室内试验和数值试验响应数据与土样性状相比较,进行 PFC2D 颗粒流细观参数标定。在参数标定时,采用了三轴压缩试验,土体试样的颗粒流模型和加载见图3。试样模型四周采用墙属性

(Wall 单元)以约束颗粒流不扩散,底部为固定约束,顶部施加均匀位移,剪切速率按每分钟应变量增加0.5% 进行控制。

表 1 土体宏观物理力学参数

类型	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
黏土	1.35	10.2	25.05	26.8
		15.2	20.15	26.0
		20.2	20.80	25.3
		25.2	21.65	24.7
		30.0	18.75	22.6

先确定土体的颗粒直径、密度和弹性模量,以减少需要标定的细观参数数量,从而降低标定难度;然

后,进行细观参数敏感性分析,梳理控制性参数;最后,正交试验依次改变参数值,通过宏、细观试验对比确定合理的参数。根据围压为 100、200、300 kPa 时的土体试样三轴压缩应力 – 应变曲线和变形值的 FPC2D 模型模拟结果(图 4),经反复率定,得到土体的摩擦系数和强度等细观参数,如表 2 所示。

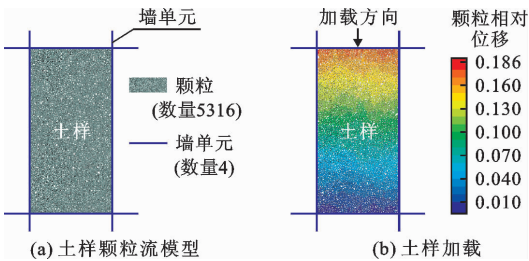


图 3 土体试样颗粒流模型及其加载示意图

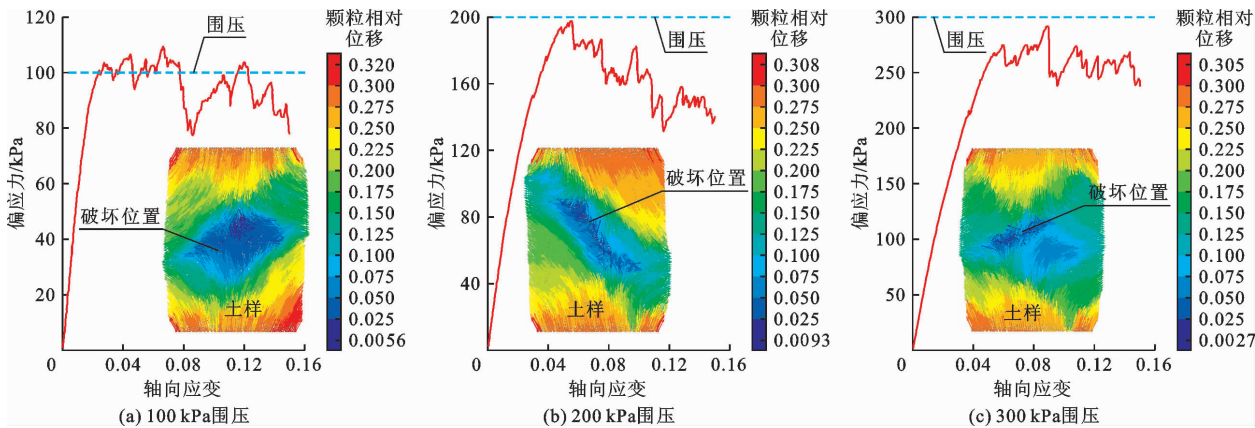


图 4 土体试样三轴压缩应力 – 应变曲线和变形图

表 2 FPC2D 模型中土体的细观参数值率定结果

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	摩擦系数	法向黏聚力/N	切向黏聚力/N
1500	10.0×10^6	8.0×10^6	0.4	3.0×10^3	3.0×10^3

3 振冲碎石桩成桩过程模拟

3.1 振冲碎石桩关键成桩工艺

振冲碎石桩成桩过程可概括为清孔、填料加密和桩径形成,如图 5 所示,其主要工艺包括:(1) 施工准备、设备组装调试和 GPS 测量放桩;(2) 挖设导孔、护筒下设,旋挖钻孔土层引孔,遇孤石冲击钻造孔;(3) 振冲造孔或旋挖造孔、清孔(图 5(a));(4) 由孔底向孔口逐渐填料加密,成桩后拔护筒(图 5(b));(5) 成桩质量检测与验收(图 5(c))。

在理论上,当地层力学参数、填料以及振动等条件都稳定时,碎石桩桩径应是完全均匀的。而实际施工时,由于各种条件具有随机性,使得桩径的粗细处于波动状态。

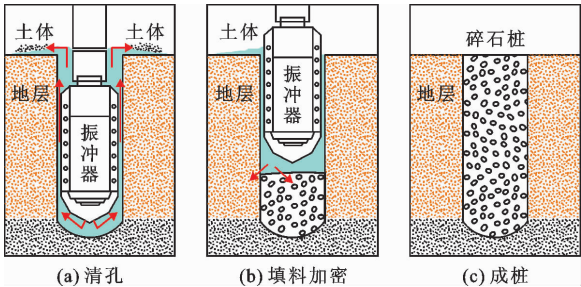


图 5 振冲碎石桩成桩过程示意图

3.2 成孔清孔过程模拟

成孔清孔时,旋挖钻机采用双底捞截面齿钻头成孔,随钻孔深度增加及时补充固壁材料,保持孔内水头压力,成孔清孔过程数值模拟见图 6。首先建立地层离散元模型(图 6(a)),然后在建立的地层

模型中挖掉指定 0.8 m 直径的钻孔,并在临空面施加横向平面力用以模拟泥浆护壁,以保持钻孔稳定(图 6(b))。对偶然掉落的离散元颗粒(泥块、杂物等)予以清除,使得数值模拟和实际清孔工序一致。

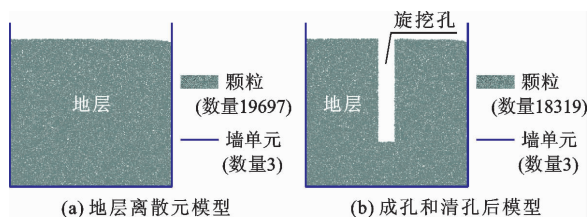


图6 振冲碎石桩成孔清孔过程模拟

3.3 填料过程模拟

成孔后自孔底开始逐段向上填料,填料自孔口开始在重力的作用下沉积到钻孔底部。对于完成填料的钻孔段,数值模拟时删除施加的泥浆护壁平面力,填料疏松地堆积在底部,保持稳定。填料过程数值模拟见图 7。

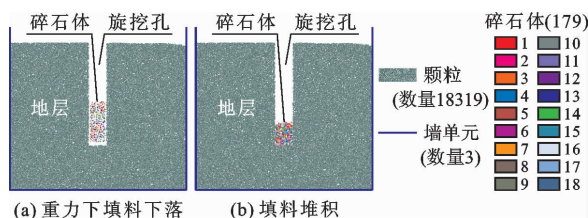


图7 振冲碎石桩填料过程模拟

3.4 振冲挤密过程模拟

填料堆积后,开启振冲器并放入孔底,在孔口填料同时制桩加密,加密从孔底逐段向上进行,留振时

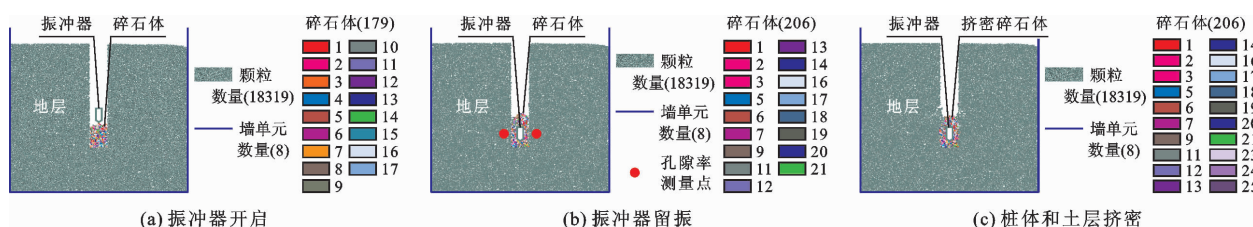


图9 振冲碎石桩振冲挤密过程模拟

间为 8 ~ 12 s,加密段长度为 0.3 ~ 0.5 m。通过给振冲器施加水平周期波模拟振冲器留振过程,图 8 为模型中向振冲器施加的水平周期振动波。

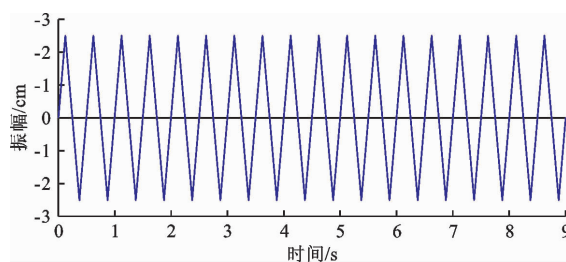


图8 振冲器水平周期振动波

振冲挤密过程模拟如图 9 所示。首先将振冲器下放到钻孔底部(图 9(a));当振冲器进入碎石体后进行水平周期振动,并在加密段长度内上下活动,留振至规定时间(图 9(b));通过振冲器作用实现桩体和土层挤密的目的(图 9(c))。完成一段桩体振冲后,上提振冲器,继续填料,循环施工,直至整个桩体完成。在段与段搭接处,振冲器做好振密搭接,以防止桩体分层。

在振冲过程中,对桩体加密段周围土体的孔隙率进行了监测,测量点布设位置见图 9(b),图 10 为振冲过程中加密段周围土体的孔隙率变化过程曲线。由图 10 可见,在留振过程中,加密段周围土体各测点的孔隙率总体上在逐渐地减小,最终达到相对稳定状态,稳定后,加密段周围土体的孔隙率较振冲前有明显减小,表明振冲碎石桩对桩间土体有很好的挤密作用。

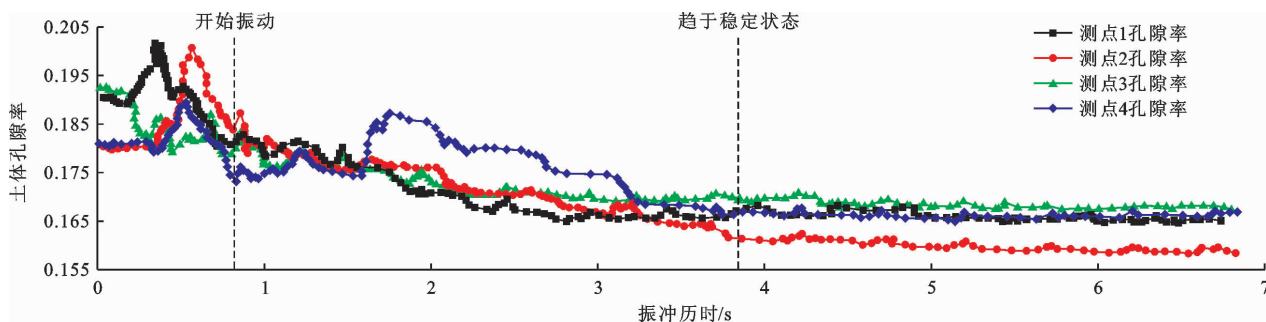


图10 振冲过程中加密段桩间土体孔隙率变化过程曲线

4 碎石桩径预测

为了控制碎石桩直径,施工中通常要控制投石量,以符合设计规范要求要求的置换率。为保证碎石填料的密实程度,留振时间应合理控制(图 11(a)),且填料需要分批添加(图 11(b))。碎石桩直径 D 根据填料量通过公式(2)计算。

$$D = 2\sqrt{\frac{V}{knl}} \quad (2)$$

式中: V 为碎石材料的填方量, m^3 ; n 为桩体的碎石填料量, m^3 ; l 为碎石桩长度, m ; k 为充盈系数, m^{-3} , 可取 1.2 ~ 1.4。

根据公式(2),结合现场施工时间和填料曲线计算出的振冲桩桩形见图 11(c)。图 11(c)所示的计算结果表明,实时桩形的边缘相对比较光滑,难以反映出桩体与周围土体的相互作用。

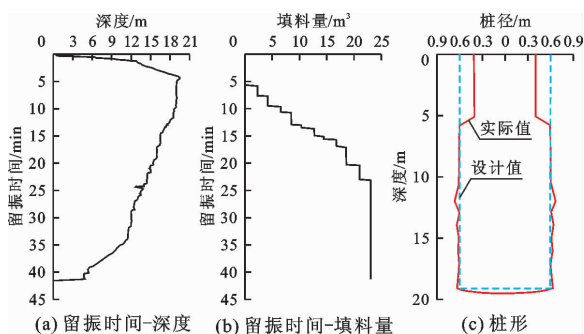


图 11 碎石桩留振时间随深度、填料量的变化曲线及桩形计算结果

通过对振冲碎石桩成桩过程的数值模拟,可以得到振冲完成后的桩形,见图 12。数值模拟平均桩径比设计值(0.6 m)偏大约 8.5%,主要归因于离散元能够更好地反映碎石和土体在振冲过程中因边界处材料互相流动所形成的由碎石向土体过渡的界面,而传统计算方法难以反映这种现象。

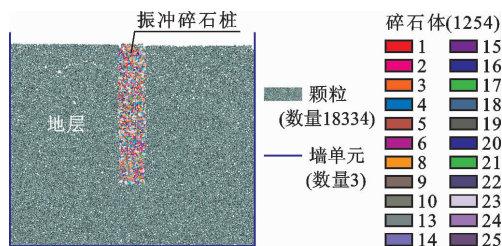


图 12 基于离散元法的振冲碎石桩桩形模拟结果

5 讨论

振冲碎石桩地层处理为隐蔽性工程,其施工质

量是建设各方的关注点,桩径尺寸的控制至关重要。以往采用理论解析方法提出桩径计算公式^[20],主要依据填料量和留振时间,但解析方法难以考虑桩体自身不均匀性和周围土层强度对桩径的影响。而本研究采用的离散元方法对松散体的模拟具有很大优势,源于 PFC2D 软件能够较好反映软弱土体与碎石体的接触及其强度力学特性,而且研究中又考虑了振冲器的水平周期振动波,因此能够模拟出振冲碎石桩的挤密加固过程,对桩体评估更加准确。

此外需要指出,振冲碎石桩的实际施工过程非常复杂并具有随机性,为了能更好实现施工质量控制,数值模拟计算参数的选取很关键。可提前固定建立模型的方法和过程模拟,在施工中实时监测振冲参数,并快速反馈到数值模型中,实现两者参数交互,使模拟结果与实际更加吻合。

6 结论

基于离散单元法开展了振冲碎石桩成桩过程模拟和桩径预测研究,得出以下主要结论:

(1) 颗粒流离散元能够较好地模拟成孔清孔、填料、振冲挤密等主要成桩过程,体现了振冲过程中碎石和土体的相互流动,模型可反映出碎石向土体的过渡界面。

(2) 留振过程中,碎石和加密段周围土体的孔隙率逐渐减小,表明振冲碎石桩对桩间土体有明显的挤密作用。

(3) 离散单元法能够模拟出碎石和土体相互作用,以此绘制的桩径和桩形表现出波动性,与常规公式计算方法相比更接近于工程实际。

参考文献:

- [1] 鲍文强. 振冲法在苏泗庄水闸地基加固中的应用[J]. 山东水利, 2020(5): 19-20.
- [2] 郑俊杰, 郭秋菊, 何春. 碎石桩复合地基承载力可靠度分析[J]. 平顶山工学院学报, 2005, 14(4): 1-5.
- [3] 梁源. 高速公路软弱路基处理中振冲碎石桩技术的应用[J]. 交通世界, 2018(Z1): 120-121.
- [4] 杨伟, 廖祖梁. 多布水电站振冲工程施工技术[J]. 西北水电, 2017(2): 58-62.
- [5] 刘兆楠, 宋兵伟. 碎石振冲桩对堤防护坡稳定的影响研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2017, 53(4): 43-45.
- [6] 陈志刚, 侯树芑, 龚泽鹏. 复杂地层振冲碎石桩施工技术研究[J]. 四川水力发电, 2022, 41(3): 27-30.
- [7] 江泊洧, 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(S1): 156-160.

(下转第 189 页)

- [6] MA Chao, SHENG Chuanming, LIAN Jijian, et al. Solidification sludge as a scour countermeasure in ocean engineering[J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110423.
- [7] 土田孝,松下弘志,吉原正博,等. 评估泡沫混合处理的土壤在水下浇注过程中的材料分离阻力[C]//土木学会论文集,2000(644):1-12.
- [8] 湯怡新,宮崎良彦,落合英俊,等. 水泥混合处理的土壤在水下浇筑过程中对海水环境的影响[C]//土木学会论文集,2002(708):211-220.
- [9] LI Yunquan, ZHU Wei, WU Silin, et al. Environmental impact of fluidized solidified silt casting on surrounding water bodies[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(5): 604-610.
- [10] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 水下不分散混凝土试验规程:DL/T 5117—2000[S]. 北京:电力出版社,2014.
- [11] 李冬梅,王文忠. 水下快凝快硬修补材料的试验研究[J]. 中外公路,2013,33(6):313-317.
- [12] 施展,沙建芳,陆加越. 絮凝剂品种对水下不分散混凝土性能影响的试验研究[J]. 江苏建筑,2016(2):104-106+110.
- [13] SIKANDAR M A, WAZIRN R, KHAN A, et al. Effect of various anti-washout admixtures on the properties of non-dispersible underwater concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118469.
- [14] HENIEGAL A M, MAATY A A E S, AGWA I S. Simulation of the behavior of pressurized underwater concrete[J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54(2): 183-195.
- [15] 陈卫涛. 深水区水下不分散混凝土抗分散剂的配制研究[J]. 国防交通工程与技术,2020,18(4):43-46.
- [16] 高礼雄,崔皓. 铝酸盐水泥基砂浆水下不分散性研究[J]. 混凝土,2020(11):105-107+111.
- [17] BALUCH K, BALUCH S Q, YANG H S, et al. Non-Dispersive anti-washout grout design based on geotechnical experimentation for application in subsidence-prone underwater karstic formations[J]. Materials, 2021, 14(7): 1587.
- [18] 王朋硕. 高性能水下不分散混凝土的制备及配合比优化[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [19] 张营. 动水水下不分散混凝土的研制及其性能测试[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [20] 张佳兴. 粘度时变浆液流变-固化特性与注浆扩散机理研究[D]. 成都:成都理工大学,2020.
- [21] 纪文栋,张宇亭,颜容涛,等. 高吸水材料改善高含水率淤泥流动性的试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(S1):281-286.
- [22] TANG Yixin, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5): 129-143.
- [23] 任晓芬. 自由下落颗粒流扩散及产尘特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [24] 黄英豪,戴济群,徐锴. 新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(2):235-244.

(上接第180页)

- [8] 于健,刘丹忠,林治佳,等. 振冲碎石桩联合堆载预压地基处理工艺在复杂地层中的应用[J]. 中国港湾建设, 2022,42(1):48-51.
- [9] 胡贵良,魏永新,刘保柱,等. 超深振冲碎石桩施工技术及应用[J]. 水力发电,2020,46(11):76-80.
- [10] 刘强,卢伟,李晓力,等. 超深振冲碎石桩加固处理深厚覆盖层围堰堰基应用研究[J]. 水利水电快报,2022, 43(4):90-95.
- [11] 任佳丽. 碎石桩处理昆明新机场红粘土地基的固结沉降分析研究[D]. 武汉:长江科学院,2008.
- [12] 卢萌盟,谢康和,王玉林,等. 碎石桩复合地基非线性固结解析解[J]. 岩土力学,2010,31(6):1833-1840.
- [13] 蒋大煌. 水下振冲碎石桩复合地基沉降计算方法及工程案例[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [14] 刘洋,闫鸿翔,汪成林. 复合振冲碎石桩加固机理及施工过程数值模拟[J]. 工程科学学报,2015,37(3):390-397.
- [15] 王家辉,饶锡保,江泊洵,等. 振冲碎石桩复合地基抗剪机理的模型试验研究[J]. 岩土力学,2021,42(4):1095-1103.
- [16] 梁雨. 基于实际工程对振冲碎石桩的研究[J]. 北方交 通,2022(3):65-67+71.
- [17] MITCHELL J K, HUBER T R. Performance of a stone column foundation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 205-223.
- [18] CASTRO J, SAGASETA C. Consolidation and deformation around stone columns: Numerical evaluation of analytical solutions[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(3): 354-362.
- [19] ALAMGIR M, MIURA N, POOROOSHASB H B, et al. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(4): 267-290.
- [20] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [21] 虞晓军,刘强,曹瑞琅,等. 基于随钻技术的振冲碎石桩施工质量评价方法研究[J]. 水利水电快报,2021,42(12):59-64.
- [22] 刘强,赵宇飞,杨帆,等. 超深振冲碎石桩施工智能化监控系统研发与应用研究[J]. 水利水电快报,2021,42(12):65-71.