

高回填地基自支护变径旋挖桩 竖向承载性状现场试验研究

刘习前¹, 张瑜^{1*}, 刘启胤¹, 黄平¹, 赵亚强¹, 梁勇¹, 雷强¹, 杨强¹, 丁选明²

(1. 重庆建工住宅建设有限公司, 重庆 400015; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 在重庆等西部城市高回填场地较多, 选用桩基作为建筑基础形式的案例也越来越多, 变径桩作为一种具有承载力高、沉降量小等优点的桩基形式, 应用较为广泛。但是目前针对高回填地基中变径旋挖桩的研究相对较少, 其承载特性和荷载传递机理等尚未明确。本文针对高回填地基自支护变径旋挖桩竖向承载性状开展了现场试验研究。现场试验位于重庆市巴南区, 桩体类型为端承摩擦桩, 针对变直径桩, 进行了单桩竖向抗压静载试验和桩身内力测试。试验结果表明随着桩长的增加, 桩体极限承载力增加明显; 在桩体变直径处, 桩体内力变化较大。

关键词: 高回填地基; 变径桩; 现场试验; 承载特性; 静载试验

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0376-06

Field test investigation on vertical bearing behavior of self-supporting rotary drilling pile with variable diameters in high backfill foundation

LIU Xi-qian¹, ZHANG Yu^{1*}, LIU Qi-yin¹, HUANG Ping¹, ZHAO Ya-qiang¹, LIANG Yong¹,
LEI Qiang¹, YANG Qiang¹, DING Xuan-ming²

(1. Chongqing Construction Residential Engineering Co., Ltd., Chongqing 400015, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In Chongqing and other western cities in China, high backfill sites spread extensively. At present, pile foundation is commonly selected as building foundation at these sites. As a type of pile foundation with high bearing capacity and small settlement, drilling pile with variable diameters is widely used. However, the research on drilling pile with variable diameters in high backfill foundation is relatively few, and its bearing characteristics together with its load transfer mechanisms are not fully investigated. In this paper, the vertical bearing capacity of self-supporting rotary drilling pile with variable diameters is investigated through field test. The single pile vertical compressive static load test and pile internal force test of an end-bearing friction pile with variable diameters are performed respectively in Banan, Chongqing. The results show that the ultimate bearing capacity of pile increases with an increase of pile length. At the depth where the diameter of the pile changes, the force inside the pile changes as well respectively.

Key words: high backfill foundation; variable diameter pile; field test; bearing characteristics; static test

0 引言

近年来, 重庆作为新一线城市, 其城市化进程飞速发展, 常规建筑用地尤为紧张, 选择高回填场地作为建筑物地基的案例越来越多。这些场地通常回填埋深较大, 原始形态为冲沟; 填筑方式多为抛填, 压实度低; 回填物大多是生活垃圾及山体爆破

后的碎石, 结构松散, 颗粒级配较差^[1-4]。

针对类似复杂地基, 工程研究人员开展了多种类型桩体的承载力特性、荷载传递机制及施工工艺的试验研究^[5-6]。李成芳等^[7]研究分析了重庆市高填方地基的工程特性, 并结合具体工程案例, 针对性的提出了旋挖成孔灌注工艺, 介绍了工艺的施工方法及其特点, 对其技术难题提出了解决措施, 并

收稿日期: 2021-06-20

作者简介: 刘习前 (1971—), 男, 重庆合川人, 高级工程师, 主要从事工程管理和工程技术研究。E-mail: 740197255@qq.com。

*通信作者: 张瑜 (1977—), 男, 重庆北碚人, 正高级工程师。主要从事工程管理和工程技术研究。E-mail: 406112389@qq.com。

讨论了该工艺下旋挖桩的成桩效果及其优势。但同时提出该工艺还在起步阶段, 仍存在不少亟待解决的问题。随后, 赵伟等^[8]从深圳沿海地区复杂地层下旋挖桩的工程应用实例出发, 介绍了该地区复杂地层桩基旋挖钻孔施工难题, 详细阐述了旋挖钻孔施工的关键技术, 验证了钻孔工艺及其参数的合理性, 为旋挖桩施工提供了较成熟的技术方案。此外, 工程研究人员针对复杂地基, 还提出了一种承载特性优势显著的桩体, 即变径桩, 并对其受力机制进行了研究^[9-12]。易耀林等^[13]针对多层软弱地基提出了变径搅拌桩加固工艺, 结合现场试验介绍了变径搅拌桩的施工及质量检测方法, 并对该桩体开展了单桩载荷试验, 研究了变径搅拌桩的单桩承载力特性, 阐明了该类型桩体相较于常规搅拌桩在承载力方面的优越性, 并进一步确定了变径搅拌桩的单桩极限承载力计算方法。方焘等^[14]开展了室内大型模型试验, 对大直径变截面单桩的竖向承载性能和破坏模式与机制进行了研究分析, 从而得出了桩体变截面对其承载力影响因素, 并对变截面桩的承载力计算方法进行了改进。

旋挖钻孔工艺与变径桩技术各有其独特的优势, 针对高回填等复杂地基可以考虑在实际工程中同时应用。但对于变径旋挖桩的研究相对较少, 其承载力特性、荷载传递机理及桩身内力分布等尚未明确, 需要进一步进行研究分析。

目前分段变径自支护旋挖桩施工技术已在重庆两江新区金科照母山项目 B5-1/05 地块二标段得到了应用, 本文进一步依托重庆市巴南地区某现场建筑高回填地基, 开展自支护变径旋挖桩单桩竖向抗压静载试验和桩身内力测试, 分析了高回填地基下自支护变径旋挖桩的单桩竖向承载力特性与荷载传递机理, 获得了其桩身轴力及侧摩阻力的分布规律, 为高回填地基变径旋挖桩的应用提供参考依据。

1 现场试验概况

1.1 工程概况

试验场地位于重庆市巴南区鱼洞高职城大道附近, 原始地貌为构造剥蚀丘陵, 内分布有素填土层、粉质土层, 下伏基岩。场地内素填土层厚度变化较大, 结构松散, 均匀性差; 粉质黏土层厚度变化大, 局部区域存在少量泥岩碎屑, 均匀性较差。场区下伏基岩主要为砂岩及泥岩, 变异系数较小, 变异性较低, 岩体较完整, 均匀性较好。场地岩土层具体物理力学参数如表 1 和表 2 所示。

1.2 试验桩基

试验桩基采用机械旋挖成孔桩, 每 5 m 变径, 试验桩长度为 10 m, 0~5 m 直径为 1.2 m, 5~10 m 直径为 0.8 m, 试验桩均为端承摩擦桩, 桩身混凝土强度等级为 C30。桩体内部安置有混凝土应变计, 应变计安装位置以及桩体整体示意图如图 1 所示。

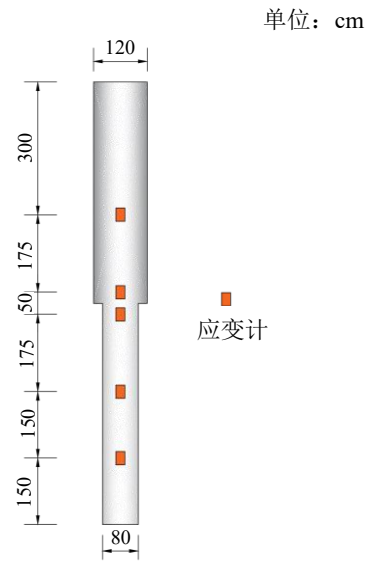


图 1 桩体示意图

Fig. 1 Test piles

表 1 场地土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土体	平均厚度 t/m	天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	地基承载力特征值 f_k/kPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
人工填土	9.9	20.5	0	0	28
粉质黏土	1.0	20.0	160	17.1	6

表 2 场地基岩岩体参数

Table 2 Parameters of bedrocks

岩性	平均厚度 t/m	天然抗压强度标准值/MPa	弹性模量 $E/10^4 MPa$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
泥岩	15.9	9.21	0.211	696	29.6
砂岩	9.5	26.64	0.790	1 779	37.6

1.3 试验设备

采用静载试验, 试验过程中加荷、监测以及数据采集所用到的主要大型设备概况如表 3 所示。

1.4 试验过程

试验桩侧预先浇筑锚桩, 用于固定反力梁, 提供荷载反力, 采用慢速维持荷载法, 静载试验采用液压千斤顶加荷, 荷载反力由锚桩提供。桩体沉降由 4 只对称电子百分表测量, 测表支架点安置在不受扰动影响的位置。试验桩加载按《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[5] 的标准进行。试验前在试压表面用粗砂找平, 其厚度不超过 20 mm。放上承压板, 安装设备并加载。每级加载量为设计单桩承载力特征值 2 倍的 1/10, 第一级按 2 倍分级荷载加载。每级荷载施加后第 5、15、30、45、60 min 观测 1 次读数, 以后每 30 min 测读 1 次。当每 1 h 的沉降不超过 0.1 mm, 并连续出现 2 次(由 1.5 h 内连续 3 次观测值计算), 认为已达到相对稳定, 可加下一级荷载。卸载时, 每级荷载维持 1 h, 按第 15、30、60 min 测读桩顶沉降量后, 即可卸下一级荷载。卸载至 0 后, 测量桩顶残余沉降量, 维持时间为 3 h, 测读时间为第 15、30 min, 以后每隔 30 min 测读 1 次, 图 2 为试验现场测试图。

表 3 主要设备概况
Table 3 Main equipment

设备名称	规格	设备状况	数量
千斤顶	YDT10000-200	良好	2 个
电动油泵	2YBZ80	良好	1 台
精密压力表	0.4 级	良好	1 只
RSM 自动	YL-PLT(1S)	良好	1 套
刚性承压板	—	—	若干
油管、电缆	—	—	若干



图 2 现场试验测试图

Fig. 2 Picture of field load system layout

2 试验结果与分析

2.1 荷载-位移曲线分析

图 3 所示为试验桩沉降变化规律。试验桩的荷载-位移曲线在荷载为 0 到 4 800 kN 时呈缓慢线性发展, 近似为直线段。在荷载为 4 800 kN 时出现了第一个陡降段, 在荷载为 6 000 kN 时出现了第二个陡降段, 在 4 800 kN 到 7 200 kN 之间为曲线段。当荷载达到 6 000 kN 之后, 呈急剧下滑态势, 近似为斜直线变形段。曲线整体未呈线性发展, 出现了陡降段, 表现出了轻微的极限破坏特征。当荷载从 6 000 kN 上升到 7 200 kN 时, 桩身的侧阻力已达极限, 同时桩端阻力开始发挥作用。此后, 增加的荷载几乎全由端阻力承担, 短时间内端阻力超过了桩端岩土体的极限承载力, 桩端岩土迅速被压实, 桩顶位移较之前显著增大, 使得荷载-位移曲线急剧下滑。当加载至 12 000 kN 时, 桩体内钢筋断裂, 终止加载, 取前一级 10 800 kN 作为极限荷载, 所对应的沉降量为 3.67 mm, 由此可得出试桩 1 的承载力特征值为 5 400 kN。荷载加载至 12 000 kN 时, 试桩 1 的累计沉降量为 4.72 mm, 卸载后残余沉降量为 2.49 mm, 最大回弹量为 2.23 mm, 回弹率仅为 47.2%, 说明桩端岩土(如沉渣)产生了较大的塑性压缩变形不能回弹。图 3 (b) 所示为桩顶沉降随时间的变化规律, 结果表明, 当荷载未超过 7 200 kN 时, 对应的 s - $\lg t$ 曲线(s 即为桩体沉降)整体上来讲还是较为平缓, 当荷载超过 7 200 kN 时, 沉降随时间增长有较为明显的增大。

2.2 桩身轴力分析

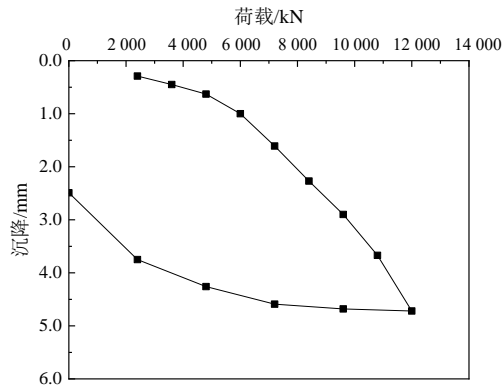
桩身轴力测试基于以下假定: 桩体在非变径段均为等截面桩, 桩径不变, 认为桩体材料均呈线性弹性, 并按下式计算各断面处的桩身轴力:

$$Q_i = \bar{\varepsilon}_i \cdot E_i \cdot A_i \quad (1)$$

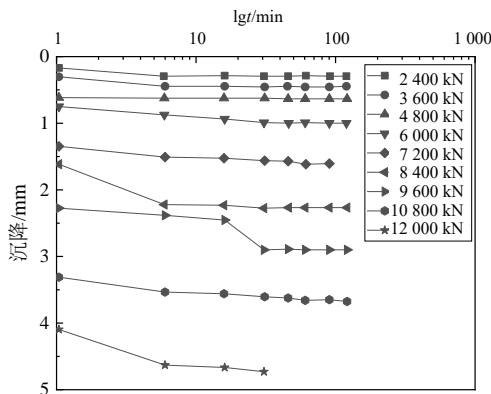
式中: Q_i 为桩身第 i 断面处轴力; $\bar{\varepsilon}_i$ 为第 i 断面处应变平均值; E_i 为第 i 断面处桩身材料弹性模量; A_i 为第 i 断面处桩身截面面积。

图 4 所示为桩身轴力沿深度分布规律。试验桩在深度 0~4.75 m 范围内, 轴力曲线大致呈直线分布, 沿深度衰减较小, 轴力与施加的荷载差别不大。在深度 4.75~5.25 m 范围内, 桩身轴力有了明显的衰减, 而试桩直径在深度为 5 m 处由 1.2 m 减小至 0.8 m, 由此可见在变截面处, 桩体轴力有较为明显的改变, 这可能是由于变截面处, 桩体截面面积较小部位的土体一部分已经开始发挥端阻力的作用,

从而较大的降低了桩体轴力。在 5.25~7 m 深度范围内, 轴力也有一定程度的衰减, 但衰减幅度较小。在 7~8.5 m 深度范围内, 桩身轴力有了明显的衰减, 尤其靠近桩端处, 说明较深处侧摩阻力有了较为充分的发挥, 也体现了端承摩擦桩所具有的特点。且从试验桩的轴力分布图可以看出, 在 7~8.5 m 深度范围内, 随着荷载的增大, 轴力曲线衰减幅度越大, 说明侧摩阻力发挥的强度与桩体沉降之间存在着正比例的关系, 桩体沉降越大, 侧摩阻力被调动的越充分, 所承担荷载的比例也不断增大。



(a) 荷载-沉降曲线



(b) 时间-沉降曲线

图 3 试验桩沉降变化规律

Fig. 3 Settlement of the test pile

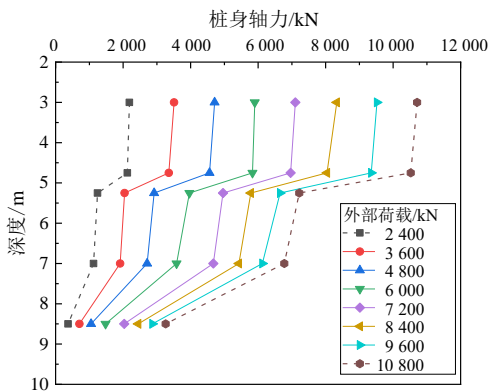


图 4 桩身轴力分布规律

Fig. 4 Distribution of axial force along depth

从荷载传递特点中可以发现, 桩侧摩阻力和桩端阻力的作用存在先后顺序, 不同阶段两者发挥作用的比例也不同。

2.3 桩身侧摩阻力分析

桩侧土的分层侧阻力应按下列公式计算:

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{u \cdot l_i} \tag{2}$$

式中: q_{si} 为桩第 i 断面与 $i+1$ 断面间侧阻力; i 为桩检测断面顺序号, $i=1, 2, \dots, n$, 并自桩顶以下从小到大排列; u 为桩身周长; l_i 为第 i 断面与第 $i+1$ 断面之间的桩长。

桩身第 i 断面处的钢筋应力应按下列公式计算:

$$\sigma_{si} = E_s \cdot \varepsilon_{si} \tag{3}$$

式中: σ_{si} 为桩身第 i 断面处的钢筋应力; E_s 为钢筋弹性模量; ε_{si} 为桩身第 i 断面处的钢筋应变。

图 5 所示为各级荷载下桩侧摩阻力随深度分布规律。试验桩 1 在 0~3 m 深度范围内侧阻力近似为 0, 在 3~4.75 m 以及 5.25~7 m 范围内侧摩阻力也较小, 说明该范围内侧阻力还远远未发挥。而在变截面处以及靠近桩端部位桩侧摩阻力较大。靠近变截面处桩侧摩阻力较大的原因可能是变截面土体端阻力的原因, 而靠近桩端处桩侧摩阻力较大是由于试验桩为嵌岩桩, 达到一定深度后, 桩侧岩石阻力发挥了较大作用, 因此桩侧摩阻力较大。

图 5 所示的桩侧摩阻力变化进一步证实了这一最佳深度范围的存在。并且这个最佳深度和土层性质、桩体截面积影响因素有关。试桩在 0~4.75 m 处由于土层软弱、地应力水平低, 即使有较大的桩-土相对位移, 侧摩阻力依然较低; 而在靠近桩端处, 由于较大的桩侧岩石阻力, 侧摩阻力随荷载等级迅速增加。

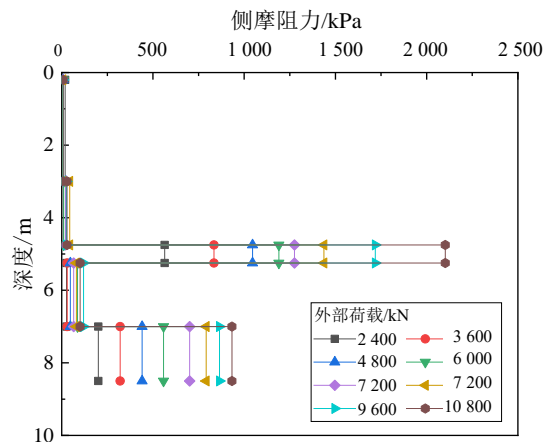


图 5 桩身侧摩阻力分布规律

Fig. 5 Distribution of side resistance along depth

3 结 论

基于现场试验开展了高回填地基下变径旋挖桩的静载试验及桩身内力测试,获得了桩体沉降、桩身轴力及侧摩阻力的现场实测数据,为今后进一步深入研究变径旋挖桩的承载特性及荷载传递机理提供了重要的工程参考。主要结论有:

(1) 对比短变径桩,相同荷载下长变径桩的沉降较小,但荷载达到一定程度时,长变直径桩内部钢筋先发生断裂,混凝土发生破裂,达到桩体极限承载力。当荷载超过极限承载力特征值一定范围时,随着时间的增加,可以观察到位移存在有明显的下降区段。

(2) 在桩体变截面处,桩体轴力有较大明显的改变,这可能是由于变截面处桩体截面面积较小部位的土体一部分已经开始发挥端阻力的作用,从而较大的降低了桩体轴力。

(3) 桩侧阻力发挥的程度与桩体沉降之间存在着正比例的关系,桩体沉降越大,侧阻力被调动的越充分,所承担荷载的比例也不断增加;在桩体变截面位置,桩体侧摩阻力较大,这可能由于变截面处土体端阻力发挥了较大的作用,被作为桩体侧摩阻力的一部分。

(4) 桩侧阻力存在最佳发挥区段,并且这个最佳深度和土层性质、桩体截面面积影响因素有关。因此在桩基设计中一味地增加桩长,并不是满足承载力的最佳方案。

参考文献

- [1] 盛伟辉. 高填方桩基施工技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
SHENG Wei-hui. Research on construction technology of high fill pile[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [2] 郑俊杰, 吕思祺, 曹文昭, 等. 高填方膨胀土作用下刚柔复合桩基挡墙结构数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 395-402.
ZHENG Jun-jie, LV Si-qi, CAO Wen-zhao, et al. Numerical simulation of composite rigid-flexible pile-supported retaining wall under the action of high-filled expansive soil[J]. Geotechnical Mechanics, 2019, 40(1): 395-402.
- [3] 郭小政. 贵州山区松散高填方区灌注桩成桩方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2014.

- GUO Xiao-Zheng. Method of filling piles in loose high fill area of Guizhou mountain areas[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014.
- [4] 王嘉鹏, 于成江, 庞卫涛. 高填方区的地基处理及桩基施工技术[J]. 建筑施工, 2016, 38(3): 253-254.
WANG Jia-peng, YU Cheng-jiang, PANG Wei-tao. Construction technology for foundation treatment and pile foundation in high earth fill area[J]. Building Construction, 2016, 38(3): 253-254.
- [5] 陈建. 旋挖成孔灌注桩桩身完整性检测试验研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
CHEN Jian. Research and application of integrity test of rotary drilling cast in-place pile[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [6] 王茂. 斜坡高填方回填对竖向桩柱结构影响因素研究及实例监控[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
WANG Mao. Study on the influence factors of slope high fill backfill on vertical pile structure and case monitoring[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [7] 李成芳, 熊启东, 孔凡林. 旋挖成孔灌注桩在松散高填方地基中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1266-1269.
LI Cheng-fang, XIONG Qi-dong, KONG Fan-lin. Application of rotary drilling cast-in-place pile in the soft high embankment[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1266-1269.
- [8] 赵伟, 吴旭君, 王召磊, 等. 旋挖灌注桩在(深圳)沿海地区复杂地层中应用实例[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 1196-1199.
ZHAO Wei, WU Xu-jun, WANG Zhao-lei, et al. Application of rotary drilling bored grouting pile in complicated formation of coastal areas (Shenzhen)[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 1196-1199.
- [9] 张新波. 变径灌注桩的特点及与普通灌注桩性能对比分析[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2005.
ZHANG Xin-bo. Characteristic of variant section cast-in-situ piles and performance analysis comparing to common cast-in-situ piles[D]. Qinhuangdao, Hebei: Yanshan University, 2005.
- [10] 蔡红英. 新型挤扩变径灌注桩成型机 CAE 研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
CAI Hong-Ying. Research and application of integrity test of rotary drilling cast in-place pile[D]. Jinan: Shandong

- University, 2005.
- [11] 向玮, 刘松玉, 经绯, 等. 变径水泥土搅拌桩复合地基承载特性的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 328-333.
XIANG Wei, LIU Song-yu, JING Fei, et al. Bearing capacity of composite foundation of soil-cement deep mixing columns with different cross-section parts[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(2): 328-333.
- [12] 向玮, 刘松玉, 经绯, 等. 深长变径搅拌桩荷载传递规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2765-2771.
XIANG Wei, LIU Song-yu, JING Fei, et al. Field test research on load transfer law of long soil-cement deep mixing columns with different cross-sections[J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(9): 2765-2771.
- [13] 易耀林, 刘松玉, 杜延军, 等. 变径水泥土搅拌桩单桩承载力试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 352-356.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Field tests on bearing capacity of single diameter-varied soil-cement deep mixed column[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(2): 352-356.
- [14] 方焘, 刘新荣, 耿大新, 等. 大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究 (I) [J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2947-2952.
FANG Tao, LIU Xin-rong, GENG Da-xin, et al. Model testing study of vertical bearing behaviors for large diameter pile with variable cross-section (I) [J]. Geotechnical Mechanics, 2012, 33(10): 2947-2952.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

【简 讯】

第十七届全国地基处理学术讨论会（一号通知）

为加强地基处理的学术交流, 提供新理论、新技术、新理念、新设备的探讨平台, 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会将于 2022 年 8 月在宁夏银川举办第十七届全国地基处理学术讨论会。会议以“黄河流域生态保护与高质量发展”国家政策为背景, 展示全国各地地基处理领域的最新研究成果与发展趋势。

论文出版:

经学术委员会评审的优秀论文在《地基处理》期刊发表, 其余论文可以论文集的形式出版。

重要时间:

提交全文截止时间: 2021 年 11 月 15 日

全文录用截止时间: 2022 年 1 月 15 日

修改稿提交截止时间: 2022 年 4 月 15 日

会议时间: 2022 年 8 月 26—28 日(26 日报到)

联系方式:

联系地址: 银川市西夏区贺兰山西路 489 号宁

夏大学贺兰山校区格物楼 122 室

邮 箱: djclhdh_2022@163.com

联 系 人: 李学丰 13995181829

张 刚 13639508696

主办单位:

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位:

宁夏大学

宁夏力学学会

中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会

协办单位:

长沙理工大学

北方民族大学

东华理工大学

银川科技学院

华东建筑设计研究院有限公司

中建中新建设工程有限公司