

基于 ABAQUS 的软土地区 CFG 桩 施工质量问题原因分析

胡瑞丰, 郑学元

(中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050022)

摘要: CFG 桩在软土地区的工程应用中常出现诸如串孔、缩颈等影响工程质量的问题, 限制了 CFG 桩在这些地区的推广应用。针对沧州某项目 CFG 桩在施工中出现的串孔现象, 利用 ABAQUS 数值模拟软件对成孔过程中桩间土体的孔隙水压力变化以及桩周土体位移进行了模拟分析, 结果显示, CFG 桩成孔过程会造成桩周土体孔压呈现先升高后下降的变化趋势, 并且孔压升高幅度较大, 极易造成土体强度降低; 同时钻杆钻进和提升过程中由于叶片间未充满土区域产生的临空面为桩周土体向新成孔内位移创造了便利条件, 使桩周土体在围压作用下向新成孔内流动, 在已成桩与新成孔之间形成土体流动通道而引发串孔。实践表明, 合理增大桩间距、适当提高钻进速度、施工中采取隔桩跳打等措施能减少串孔现象的发生。

关键词: 软土地区; CFG 桩; 串孔; 孔隙压力; ABAQUS

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)06-0514-06

Cause analysis of CFG pile construction quality problems in soft soil area based on ABAQUS

HU Rui-feng, ZHENG Xue-yuan

(Zhongtu International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, Hebei, China)

Abstract: In the engineering application of CFG pile in soft soil areas, problems such as stringing holes and necking that affect the quality of the project often occur, which limits the popularization and application of CFG pile in these areas. Aiming at the phenomenon of string holes in the construction of CFG piles in a project in Cangzhou, ABAQUS numerical simulation software was used to simulate and analyze the pore water pressure changes of the soil between the piles and the displacement of the soil around the piles during the hole formation process. The results show that the pore-forming process of the CFG pile will cause the soil pressure around the pile to increase first and then decrease. In addition, the pore pressure increases greatly, which can easily cause the soil strength to decrease. At the same time, during the drilling and lifting of drill pipe, the free surface generated by the unfilled soil area between the blades creates a convenient conditions for the displacement of the soil around the pile into the newly formed hole. This causes the soil around the pile to flow into the newly formed hole under the action of confining pressure, forming a soil flow channel between the existing pile and the newly formed hole and causing the string hole. Practice has shown that measures such as reasonably increasing the pile spacing, appropriately increasing the drilling speed, and adopting pile jumping during construction can reduce the occurrence of string holes.

Key words: soft soil area; CFG pile; string hole; pore pressure; ABAQUS

0 引言

长螺旋钻孔泵压素混凝土桩 (CFG 桩) 因其具有施工速度快、工期短、质量容易控制、工程造价

低廉等特点, 目前已成为北方地区应用最普遍的地基处理技术之一。但是随着 CFG 桩的大面积推广应用, 工程施工中出现的质量问题也越来越多, 尤其在软土地区, CFG 桩施工过程中常会出现串

孔、缩颈、断桩等严重影响成桩质量的问题,很大程度上限制了这一技术在软土地区的进一步推广应用。

大量工程实践表明,CFG 桩施工过程中产生的串孔、缩颈、断桩等一系列工程质量问题多出现在含有深厚软弱土层,且土体含水量较大的地区。闫明礼等^[1]对 CFG 桩在含深厚软弱土层地区应用中较易出现的质量问题以及处理方法进行了详细阐述;赵秀绍^[2]针对郑州地区 CFG 桩施工引起的工程环境问题进行了试验研究,提出了一些针对性的改进措施;文献^[3-6]针对长螺旋钻孔泵压 CFG 桩在深厚软弱土层中的应用进行了深入探讨,提出了控制成桩质量的具体措施。本文针对沧州河间某项目 CFG 桩施工中出现的串孔问题进行理论分析,采用 ABAQUS 软件进行数值模拟,找出引起串孔现象的内在原因,将模拟结果与施

工参数进行对比,得出的结论对工程实践具有一定的指导意义。

1 项目概况

沧州河间某项目位于河间市西北部,长卿街与胜利路交叉口。据勘察报告,场地地貌单元位于永定河、大清河、子牙河、南运河、宣惠河等“黑龙港流域”形成的冲击、沼泽相沉积平原的东部。桩长范围内土层分布主要有粉质黏土、粉土、粉质黏土夹粉土层。场地水位埋深位于地面下 10 m 左右,水位较高。桩顶标高约为地面下 5 m。

桩长范围内地层情况如表 1 所示。

项目包含 17 栋住宅楼及地下车库,住宅楼均采用 CFG 桩复合地基,出现串孔现象的 6 号楼桩设计参数如表 2 所示。

表 1 桩长范围内地层情况统计表
Table 1 Statistical table of ground conditions within the range of pile length

分层 编号	岩土名称	厚度/m	重度/(kN/m ³)	天然土压缩 模量/MPa	含水率/%	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①	粉土	0~2.4	13.6	3.7	16.2	1.086	6.4	27.2
② ₋₁	粉质黏土夹粉土	0~1.2	18.1	4.3	20.7	0.791	18.9	16.9
②	粉质黏土	3.4~5.3	18.2	3.9	26.3	0.864	26.5	13.1
③	粉质黏土	1.2~2.0	19.0	4.2	24.9	0.761	23.3	12.9
④	粉土	0.9~1.7	18.8	7.3	23.3	0.751	5.4	15.4
⑤	粉质黏土	2.7~4.6	19.4	8.5	23.7	0.704	20.9	11.2
⑥ ₋₁	粉土	1.5~3.2	19.6	13.8	21.8	0.649	5.7	24.4
⑥	粉质黏土	3.6~5.6	19.6	8.8	23.2	0.678	27.0	15.1

表 2 6 号楼 CFG 桩设计参数
Table 2 Design parameters of CFG pile in building 6

楼号	桩径/mm	有效桩长/m	桩数/根	桩间距/m	桩端持力层
6 号	400	16.0	195	1.2×1.2	⑥层粉质黏土

2 施工中存在的问题

该项目首先进行 6 号楼的 CFG 桩施工,施工过程中部分桩混凝土面出现下沉现象。如图 1 所示,43 号桩施工完成后,接着施工 44~50 号桩,钻机折返施工 51~59 号桩,在 52 号桩成孔完成开始灌注时,发现 43 号桩混凝土面有下沉现象,初步判断 43 号桩和 52 号桩之间出现串孔情况,随即采取措施:正在施工中的 52 号桩钻杆停止提升,在原位继续灌注,试图利用 52 号桩孔内混凝土压力将 43 号桩混凝土面向上抬升。继续灌注后通过测量发

现 43 号桩孔内混凝土面有一定抬升,但仍未达到设计桩顶标高,此时 52 号孔由于钻杆埋深过大,已无法继续灌注,经与建设单位及监理单位现场协商后继续施工,待开槽后对 43 号桩视情况做后续处理。

从图 1 可以看出,桩身混凝土已部分凝固,中间混凝土下沉,下沉深度为 30 cm。后根据设计单位处理意见,将上部桩体凿除进行补桩处理,处理后经载荷试验,桩体承载力满足设计要求。

后续施工中为保证成桩质量,采用隔桩跳打,避免了类似情况的再次出现,开槽后发现成桩效果较好。

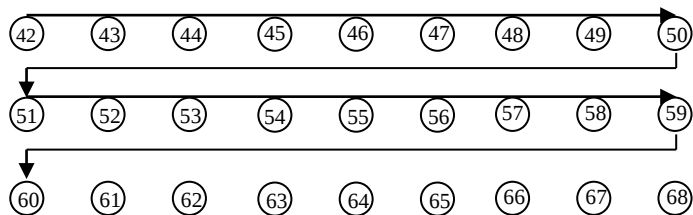


图 1 CFG 桩施工顺序及 43 号桩桩顶混凝土面下沉

Fig. 1 Construction sequence of CFG pile and concrete surface sinking at the top of pile 43



3 基于 ABAQUS 的桩周土体孔压变化分析

针对上述情况,采用 ABAQUS 软件对成桩过程中桩周土体的孔隙水压力变化进行有限元分析,找出成桩过程中引起串孔现象的内部作用机理,为后续工程采取规避措施提供可靠依据。

(1) 计算所采用的本构模型及参数选取

ABAQUS 提供了一系列用于模拟岩土体的本构模型,如弹性模型中的线弹性模型、多孔介质弹性模型和线黏弹性模型,塑性模型中的 Mohr-Coulomb 模型、扩展的 Drucker-Prager 模型、修正 Drucker-Prager 帽盖模型和临界状态塑性模型 (Critical state plasticity model),即修正剑桥模型^[7]。

根据现场情况,考虑本工程施工过程中出现的桩顶混凝土面下沉现象是由串孔引起的,结合勘察报告中的地层描述,以及出现串孔现象时 52 号桩内钻杆位置等信息,综合判断串孔现象可能出现的位置位于桩身范围内地下水位以下饱和粉土层。对本工程桩周土体的孔隙水压力变化情况进行数值模拟,采用线弹性模型较为准确,参数选取也较为简单。

根据勘察报告,出现串孔的土层深度约为地面下 15 m,该层土天然含水量最大值 41.6%,最小值为 16.9%,平均值 28%,接近液限,土质不均匀,属高压缩性土。该层土厚约 2 m,重度为 19.2 kN/m³,压缩模量为 4.39 MPa,黏聚力为 16.8 kPa,内摩擦角为 11.6°,渗透系数根据经验取值 10⁻⁸ m/s,泊松比为 0.3^[8-10]。

(2) 基于 ABAQUS 的桩周土体孔压变化规律分析

对 52 号桩和 43 号桩中间区域 (深度为地面下 15 m) 选取部分土体进行 ABAQUS 数值模拟,建立三维模型,尺寸根据设计图纸确定为 1.0 m×0.8 m×0.1 m,如图 2 所示。

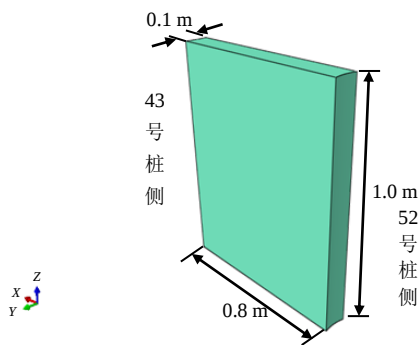


图 2 模型尺寸

Fig. 2 Model size

对该模型进行网格划分,共划分为 1 000 个单元,见图 3。因需要对施工过程中土体内孔压变化以及固结沉降进行分析,因此分析过程定义两个瞬态固结分析步。第一个分析步中施加荷载,所有荷载都为瞬时施加;第二个分析步为成孔过程中钻杆对土体切削挤压作用对土体孔隙水压力变化的影响。

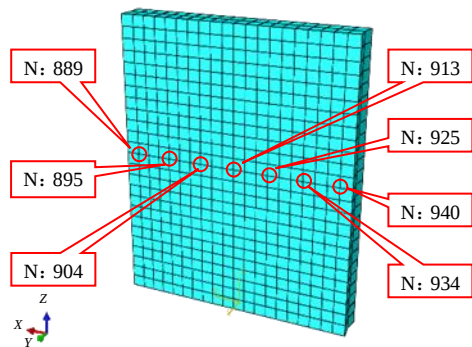


图 3 模型网格划分

Fig. 3 Model meshing

成孔完成后灌注混凝土之前,孔周土体存在临空面,因此需在第二个分析步将 52 号桩孔周土体边界条件设为排水。

对模拟结果进行分析,孔隙压力变化云图如图 4 和图 5 所示,图 4 为成孔初期荷载施加瞬间桩周土体孔压变化云图,图 5 为成孔完成后桩周土体内孔隙压力云图,从图中可以看出,桩成孔初期靠近新成孔的桩周土体孔压升高最为明显,随着时间推移,新成孔逐渐完成,孔周形成临空面,最大孔压

逐渐向已成孔靠近,成孔完成后桩间土体内孔隙水压力均有明显提高,最大值达到 211.6 kPa,已明显超过上覆土重,土体强度降低。

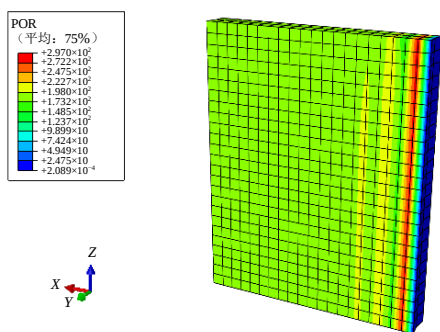


图4 荷载施加瞬间桩间土孔隙压力变化云图

Fig. 4 Cloud map of soil pore pressure loading between piles at the moment of loading

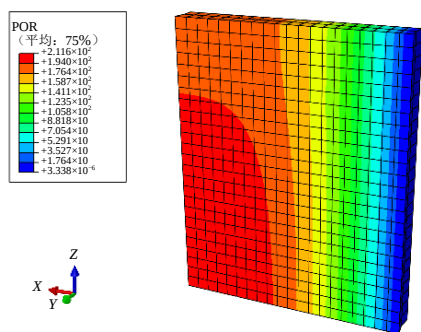


图5 桩成孔完成后桩间土体孔隙压力变化云图

Fig. 5 Cloud map of pore pressure between piles after pile pore completed

图6为孔隙压力在分析区域内横向变化规律,从图中可以看出,邻近52号桩位置孔压变化最为明显,变化幅度也最大,在成孔初期孔压最大值达到297 kPa,已大大超过上覆土重,随着位置向43号桩靠近,孔压变化幅度越来越小,但最大孔压值也都超过了该位置的上覆土重,致使土体强度降低,在围压作用下桩周土体容易向新成孔内流动,形成串孔。

成孔过程中孔隙压力先上升后下降的变化趋势与文献^[2]描述的孔隙压力在桩施工期间均呈现下降趋势的现场试验结果有明显差异。分析认为造成这种现象的原因是由于文献^[2]采用的孔压计量程偏大,数据读取的精度有限,而通过数值模拟可见最大孔压出现的时间较短,试验过程中有些数据可能会出现漏读等情况,从而造成试验结果和模拟结果的差异。

图7为分析区域中心点孔压变化以及有效应力变化趋势,土体孔隙压力在成孔过程中有先上升后

下降的趋势,同时随着孔隙压力降低,有效应力逐步升高,造成土体固结沉降,而这种固结沉降不能在短时间内完成,这也解释了为什么部分工程在CFG桩施工完成一段时间后才发现周边地表沉降及裂缝,施工过程中却没有明显变化。

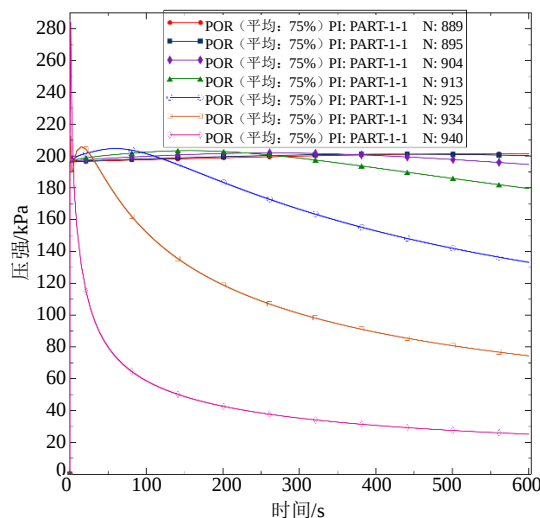


图6 孔隙压力横向变化规律

Fig. 6 Lateral variation of pore pressure

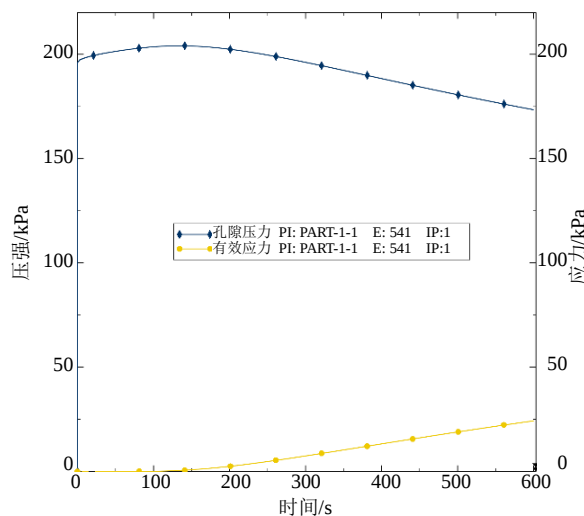


图7 中心点孔隙压力和有效应力变化规律

Fig. 7 Variation of pore pressure and effective stress at the central point

43号孔所呈现的桩体混凝土中心下沉周边凝固现象说明52号桩是在43号桩施工完成一段时间以后再进行施工的,说明桩体混凝土未完成初凝之前,相邻桩施工仍会对已成桩造成影响。

(3) 基于 ABAQUS 的桩周土体位移分析

长螺旋施工过程中常会出现螺旋叶片之间的孔隙没有被土体充满的情况,如图8所示。

施工中这种没有充满土的空间正好对桩周土体形成临空面,为桩周土体向孔内移动创造有利条

件。利用 ABAQUS 对该部分土体位移进行分析，模型尺寸见图 9。

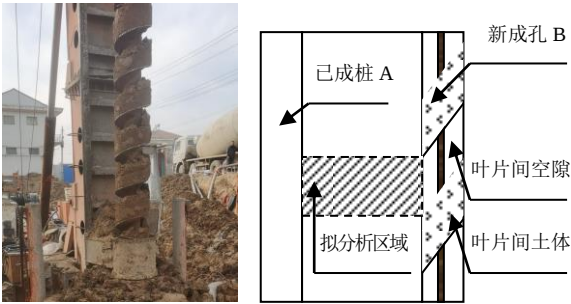


图 8 桩间土拟分析区域示意图

Fig. 8 Schematic diagram of analytical area between piles

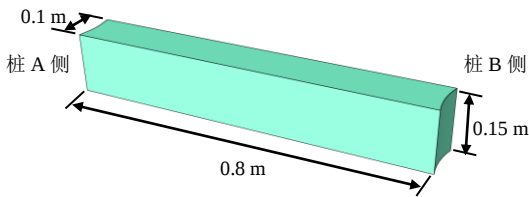


图 9 桩间土拟分析区域模型尺寸

Fig. 9 Model size of analytical soil between piles

由于分析过程中土体可能会出现大变形的情况，岩土材料模型采用 Mohr-Coulomb 模型，其中剪胀角和绝对塑性应变均取 0，其余土体参数和钻孔深度不变，桩周土体的位移云图如图 10 所示。

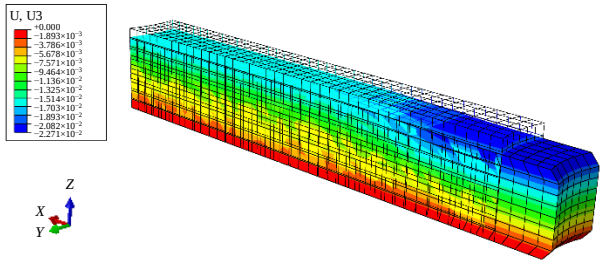


图 10 桩周土体位移云图

Fig. 10 Cloud map of soil displacement around the pile

模拟结果显示在土体自重荷载以及围压作用下，桩周土体通过螺旋叶片中间的临空面向新成孔内位移量达到 9.3 mm，这其中部分土体会被旋转的叶片带出钻孔，造成钻孔过程中的过量取土。

桩周土体位移量的大小与土体参数有很大的关系，表 2 列出了土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 对位移的影响。

表 2 不同 c 、 φ 值对应的桩间土水平位移量

Table 2 Horizontal displacement of soil between piles corresponding to different values of c and φ								mm
内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa							
	5	10	15	20	25	30	35	
5	63.0	59.5	56.0	52.6	49.1	45.7	42.2	38.8
10	31.5	29.8	28.0	26.3	24.6	22.8	21.1	19.4
15	20.9	19.8	18.6	17.5	16.4	15.2	14.1	12.9
20	15.7	14.8	13.9	13.1	12.2	11.4	10.5	9.7
25	12.5	11.9	11.2	10.5	9.8	9.1	8.5	7.8
30	10.5	10.0	9.4	8.8	8.3	7.7	7.1	6.6
35	8.9	8.7	8.1	7.7	7.2	6.8	6.3	5.8

从表 2 数据可以看出，不同土体强度所对应的位移量变化较大，尤其对处于软塑或流动状态的软土，临空面的存在会造成桩周土大量流向桩孔内并随钻杆叶片带出地面，造成两桩中间土体部分缺失，土体强度进一步降低。这也是造成串孔的主要原因。

不论对于何种土质条件，长螺旋成孔过程对桩周土体位移的影响是普遍存在的，只是这种影响会随着土体强度的降低而更加明显，因此软土地区长螺旋施工必须采取有效措施保证成桩质量。

此外，桩间土体的位移也会随着钻孔深度的增加而变化，表 3 为桩间土位移量随深度变化的数值模拟结果。

表 3 不同钻孔深度桩周土体水平位移量

Table 3 Horizontal displacement of soil around piles with different drilling depths	
分析区域距地面距离/m	桩周土体水平向位移/mm
2	0.004
4	1.100
6	3.000
8	6.000
10	9.000
12	12.100
14	15.000
16	17.800
18	20.800
20	23.300

由表3可见成孔过程中土体的横向位移量随钻孔深度而逐渐增大。这也解释了工程实践中大量串孔的发生是在距离地面一定深度处的软弱土层,而不是埋藏较浅的土层。

由于钻杆叶片中间临空面的存在为土体位移创造了必要条件,因此合理减小叶片螺距,使钻出土充满叶片之间区域,同时适当增加钻进和提钻速度,能有效降低桩周土体位移趋势。

施工过程中出现串孔现象以后,经初步分析认为引起串孔现象的原因可能是由于桩距较小,桩长范围内存在软弱土层等,因此采取隔桩跳打的措施,后期又出现过一次类似现象,由于发现及时,采取邻近桩回灌等措施,未出现桩体质量缺陷,经检测桩基承载力和桩身完整性都符合设计要求。其余楼栋 CFG 桩施工均采用隔桩跳打方式,未出现串孔及桩顶混凝土下沉现象。

4 结 论

软土地区 CFG 桩施工过程中较易出现串孔现象,通常会造成已施工桩混凝土面下沉,出现桩身质量问题。通过 ABAQUS 数值模拟软件对施工期间桩间土体孔隙水压力变化以及成孔过程对桩周土体的位移变形等影响进行模拟分析,发现成孔过程会造成桩周土体孔压明显升高,虽然持续时间很短,但足以使土体强度降低,同时成孔过程中临空面的存在造成桩周土体产生向新成孔内的位移变形,造成土体强度进一步降低并引发串孔。实践证明,增大桩间距,隔桩隔排跳打能减少串孔现象的发生。

参考文献

- [1] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 153-158.
YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. CFG Pile Composite Foundation Technology and Engineering Practice[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2006: 153-158.
- [2] 赵秀绍. CFG 桩施工引起工程环境问题的试验研究与有限元分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
ZHAO Xiu-shao. The experimental research & finite element analysis of engineering environmental problems caused by CFG pile construction[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [3] 戴文文, 戴敏. 长螺旋钻孔压灌桩在深厚黏土层施工关键技术研究[J]. 科学技术创新, 2021(16): 118-119.
DAI Wen-wen, DAI min. Research on key technology of long spiral drilling pressure grouting pile in deep clay layer[J]. Science and Technology Innovation, 2021(16): 118-119.
- [4] 王涛涛. 长螺旋 CFG 桩施工过程数值仿真及桩土参数变化规律的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
WANG Tao-tao. Numerical simulation of long spiral CFG pile construction process and study on the variation law of pile-soil parameters[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [5] 程涛, 柳彬彬, 吴笛, 等. 长螺旋钻孔灌注桩在水厂工程中的应用及质量控制[J]. 工程技术研究, 2021, 6(6): 38-40.
CHENG Tao, LIU Bin-bin, WU Di, et al. Application and quality control of long spiral bored cast-in-place pile in water plant engineering[J]. Engineering Technology Research, 2021, 6(6): 38-40.
- [6] 李根红, 何立超, 张浩, 等. 黄泛区长螺旋压灌法 CFG 桩施工力学问题分析[J]. 河南科学, 2020, 38(12): 1944-1950.
LI Gen-hong, HE Li-chao, ZHANG Hao, et al. Analysis on construction mechanics of CFG pile with long spiral pressure grouting method in Yellow River flood area[J]. Henan Science, 2020, 38(12): 1944-1950.
- [7] 费康, 彭劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 190-196.
FEI Kang, PENG Jie. Detailed Explanation of ABAQUS Geotechnical Engineering Example[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017: 190-196.
- [8] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
The Editorial Committee of the Engineering Geological Manual. Engineering Geology Manual[M]. Fourth Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [9] 王凡俊. 软土地区桩基施工群孔效应对周边环境的影响机理及控制措施研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
WANG Fan-jun. Research of mechanism and control methodology of the influence of borehole-group effect on the environment in soft soil area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [10] 尹小卡, 杜思义, 王涛涛. 砂土液化与水泥粉煤灰碎石桩施工参数关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2518-2524.
YIN Xiao-ka, DU Si-yi, WANG Tao-tao. Experimental study on the relationship between sand liquefaction and construction parameters of cement fly ash gravel pile[J]. Geotechnical Mechanics, 2021, 42(9): 2518-2524.