

桑松魁,白晓宇,高强,等.风化岩地基 CFG 桩复合地基承载特性现场试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(3):33-38. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.005

Sang S K, Bai X Y, Gao Q, et al. Field Test of Bearing Behavior of CFG Pile Composite Foundation in Weathered Rock Foundation [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3):33-38. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.005

风化岩地基 CFG 桩复合地基承载特性现场试验

桑松魁¹,白晓宇^{1,2*},高强³,张明义^{1,2},牟洋洋¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033;

2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心,山东 青岛 266033;

3. 青岛海信房地产股份有限公司,山东 青岛 266071)

摘要:为研究嵌岩短桩复合地基的承载性状与沉降变形的主要影响因素,以7根CFG嵌岩短桩复合地基的静载荷试验为依托,并结合场地勘察报告对试验结果进行分析.研究表明,在青岛地区采用CFG短桩加固软土地基可取得良好的效果,两个试验区CFG桩复合地基承载力特征值分别为430,450 kPa,均满足设计要求且其承载力仍有发挥余地;CFG嵌岩短桩(3~7 m)*P-s*曲线为缓变形,呈*s*型变化,表现出半刚性端承型桩的特性;该嵌岩短桩复合地基的沉降变形主要来自桩身的压缩量,对于嵌岩灌注短桩(3~6 m),其桩长增长60%~67%,沉降量可增长52%~78%,对于嵌岩灌注短桩(7~8 m),桩长增长1%~4%,沉降量可增长36%~106%,但总沉降量仍较小,不超过14.5 mm,满足工程变形要求.研究结果可为类似工程CFG桩的设计和应用提供参考依据,提高经济效益.

关键词:CFG短桩;风化岩地基;静载荷试验;承载性状

中图分类号:TU470

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)03-0033-06

Field Test of Bearing Behavior of CFG Pile Composite Foundation on Weathered Rock Foundation

Sang Songkui¹, Bai Xiaoyu^{1,2*}, Gao Qiang³, Zhang Mingyi^{1,2}, Mu Yangyang¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China;

3. Qingdao Hisense Real Estate Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to study the main influencing factors of bearing behavior and settlement deformation of rock-socketed short pile composite foundation, the static load tests of seven CFG rock-socketed short pile composite foundation were carried out, and the test results were analyzed in combination with site investigation reports. The results show that the CFG short pile can be used to reinforce the soft soil foundation in Qingdao, and the bearing capacity characteristic values of the CFG composite foundation in the two test sites are 430, 450 kPa, respectively, which satisfy the design requirements and still have room to exert its bearing capacity. The *P-s* curve of the CFG pile socket into rock, with length from 3~7 m, showing “s” type change, appearing the

收稿日期:2018-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708316; 51778312); 山东省重点研发计划项目资助(2017GSF16107; 2018GSF117008); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EEQ08; ZR2017PEE006); 山东省高等学校科技计划项目资助(J16LG02); 青岛市博士后应用研究项目资助(2018101); 中国博士后科学基金资助项目(2018M632641)

*通信作者, Email:baixiaoyu538@163.com

characteristics of semi-rigid end-bearing pile. The deformation of the composite foundation is mainly stemmed from the compression of the pile. For the pile with length ranging from 3~6 m, the settlement increases by 52%~78% as the length increased by 60%~70%, while the settlement increases by 36%~106% as the pile length increases by 1%~4% for pile with length ranging from 7~8 m. Even so, the whole settlement does not exceed 14.5 mm, which meets the need of construction. The results provide design and application references for the similar CFG pile, and improve the economic benefits of similar projects.

Keywords: CFG short pile; weathered rock foundation; static load test; bearing behavior

近年来,伴随我国基础设施建设的加快,CFG桩复合地基加固处理技术在我国许多地区得到发展和应用.特别地,在超高层建筑物加固处理中也有采用^[1].CFG桩复合地基作为一种非柔性、非刚性亚类桩,是在地基中运用施工机械将水泥、粉煤灰、碎石灌注成桩,桩与地基土协同承担上部荷载的人工地基^[2-3].该地基处理方法具有节能环保、成本低、桩身强度高、桩土协同作用性能好、应用范围广等优点^[4].CFG桩加固处理地基的原理是在地基中成桩后,随着时间的推移桩身强度逐渐增长,又在成桩过程中桩身材料和桩周土体发生化学反应,以及成桩对周围土体的挤密作用,使土体强度大幅提高,因而对桩的约束作用越强,桩-土可共同承担更大的褥垫层分配的上部荷载.

目前,关于CFG桩加固地基的方法已有部分学者和工程技术人员进行过相关研究.詹云刚(2004)^[5]采用数值模拟的方法研究了柔性基础下CFG桩复合地基褥垫层的作用机理.刘保民等(2005)^[6]介绍长螺旋钻孔管内泵压CFG桩加固处理饱和软土地基的施工工艺、质量检测及处理效果.王炳龙等(2006)^[7]结合CFG桩加固处理深厚层软土地基的试验结果,分析了该复合地基沉降规律,探讨了工后控制沉降的效果及其沉降计算算法.徐毅等(2006)^[8]通过CFG桩加固某高速公路软基的现场试验研究,分析了CFG桩复合地基桩、桩间土的应力状态和变形特性.Chen等(2008)^[9]讨论了单CFG桩和CFG桩复合地基垂直承载力的影响因素和计算方法.Feng等(2011)^[10]讨论了三桩复合地基垫层厚度和刚度对桩土应力比的影响基础,验证了褥垫层厚度变化对桩土负荷分布具有良好的调节作用.宋荣方等(2013)^[11]结合30层的高层建筑地基处理项目,探讨了长短桩复合地基承载力与沉降设计计算方法.王旭等(2013)^[12]在饱和黄土区进行CFG桩单桩和单桩复合地基静载荷试验,试验结果为该区工程应用提供了参考依据.刘伍等(2015)^[13]通过对比分析3个不同深度及岩性的桩端持力层,判别了某35层住宅地基运用CFG桩加固处理的可行性.

总结发现,目前诸多学者的研究主要集中于CFG桩在特殊土地基中的加固效果,且CFG桩桩长较长,表现出摩擦桩的性质,而对风化岩地区、桩长较短、端承的CFG桩复合地基研究较少.青岛地区作为我国风化岩分布区之一,其风化岩分布特点是埋深较浅、完整性好、承载力大、压缩模量高等.为了扩大和提高CFG桩在青岛风化岩地区地基加固处理中的应用范围和实用性,本文探讨了青岛市崂山区某高层建筑的地基运用CFG桩加固处理项目,并通过CFG桩复合地基的静载荷试验,研究了7根CFG嵌岩短桩复合地基在上部荷载作用下的承载机理和变形特性,并对影响CFG桩复合地基沉降的主要因素进行的分析.

1 试验场地及工程地质

该项目位于青岛市崂山区的两栋高层住宅楼.该建筑地基土层为较薄的第四系,结构相对简单,地基剖面图见图1,土的物理力学指标见表1,桩体参数设置见表2.基岩浅而厚,表面基岩主要为燕山晚期花岗岩,在局部带有后期侵入的煌斑岩、细粒花岗岩岩脉等,第②~④层在场地内分布不连续.第①层为主含水层,为第四系孔隙潜水;在基岩中地下水量小、径流和透水条件差.地下水的补给主要来自大气降水,下渗流到基岩含水岩组.

场区内天然地基较软弱,设计拟采用水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)提高地基承载力的处理方案.CFG桩采用长螺旋压灌成桩工艺,螺旋钻头为岩石螺旋钻头,可钻进强风化岩层,实现了桩端嵌入强风化岩层.两栋楼的基础设置情况:A楼采用筏形基础,基础下CFG桩总桩数713根,桩径0.5m,桩长3~6m,桩中心距1.2m,正方形排列布置,经处理后地基承载力特征值为430kPa;B楼采用筏形基础,基础下CFG桩

总桩数 580 根,桩径 0.5 m,桩长 7~8 m,在场区内 CFG 桩的布置形式同 A 楼,设计要求处理后地基承载力特征值为 450 kPa.两栋楼的桩端持力层均为燕山晚期强风化花岗岩.

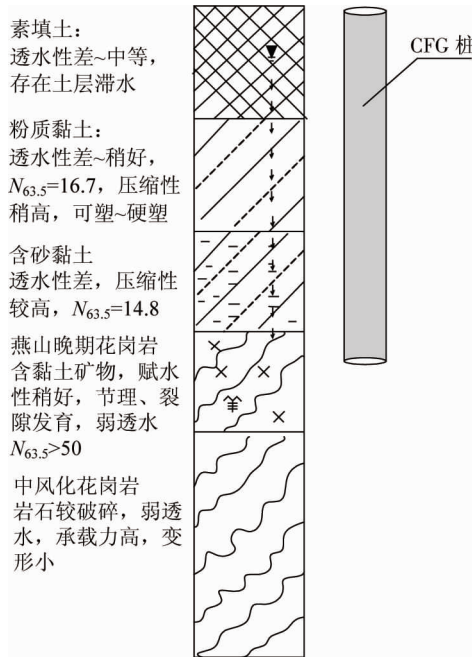


图 1 地基剖面

表 1 土的物理力学指标

土层名称	天然密度 /(g/cm ³)	含水率/ %	标准贯入 锤击数	孔隙 比	液性 指数	压缩模 量/MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	地基承载力 特征值/kPa
粉质黏土	1.80	22.0	16.7	0.711	0.38	5.64	46.7	29.4	180
含砂黏土	1.90	26.5	14.8	0.789	0.26	4.94	41.0	25.0	170
强风化花岗岩	2.25	/	>50.0	/	/	46.00	40.0	30.0	800

表 2 桩的参数设置

测点编号	所属场地	桩长/m	桩径/m	桩距/m	嵌岩深度/m
A-1	A	3.5	0.5	1.2	0.75
A-2		3.3	0.5	1.2	0.75
A-3		5.6	0.5	1.2	0.75
A-4		3.8	0.5	1.2	0.75
B-1	B	7.3	0.5	1.2	0.5
B-2		7.4	0.5	1.2	0.5
B-3		7.6	0.5	1.2	0.5

2 试验方案

为了研究风化岩基端承 CFG 短桩的承载特性和加固处理软基效果,选择场区内具有代表性的 7 个单桩复合地基进行静载荷试验,并将场地的工程和水文地质条件与静载试验结果相结合分析.

试验时,采用慢速维持荷载法.根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)^[14],A, B 楼承压板为正方形,承压板边长均为 1.2 m,在承压板下铺设 50 mm 厚砂石垫层.试验预估最大加载量为 1 700 kN,千斤顶 2 000 kN,试验设备为武汉岩



图 2 静载荷试验现场

海工程技术有限公司生产的 RS-JYB 基桩静载荷试验系统,可实现自动分级加载并实时采集、储存数据. A, B 楼均分采用 10 级加载, A 楼每级加载 86 kPa, B 楼每级加载 90 kPa. 现场试验情况如图 2 所示.

3 试验结果及分析

为了研究 CFG 嵌岩短桩复合地基承载性状和变形特性,将其与嵌岩桩建立联系.关于嵌岩桩的研究,众多学者认为桩的长径比、地基土层性质、桩周嵌岩段的岩性以及成桩工艺是影响嵌岩桩承载性状和荷载传递特性的主要因素^[15].关于 CFG 桩复合地基的沉降的研究,有静载试验学者认为外荷载条件、桩长、桩径、桩间距、褥垫层、桩土应力比、面积置换率、下卧层地基土的性质和地下水情况等是影响复合地基沉降变形的主要因素^[16-18].其中外荷载、荷载量级及加载方式是影响 CFG 桩复合地基沉降的直接原因^[19].承压板下垫层的铺设方式对复合地基承载力的检测有较大的影响^[20].

3.1 CFG 嵌岩短桩复合地基承载性状分析

A, B 楼 7 根单桩复合地基静载荷试验的 $P-s$ 曲线如图 3 和图 4 所示.

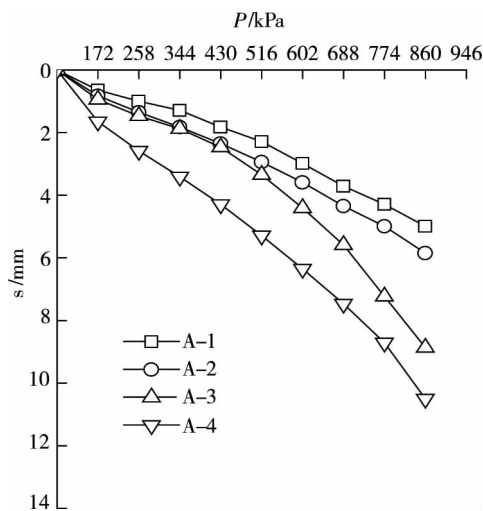


图 3 A 楼 4 个单桩复合地基荷载-沉降曲线

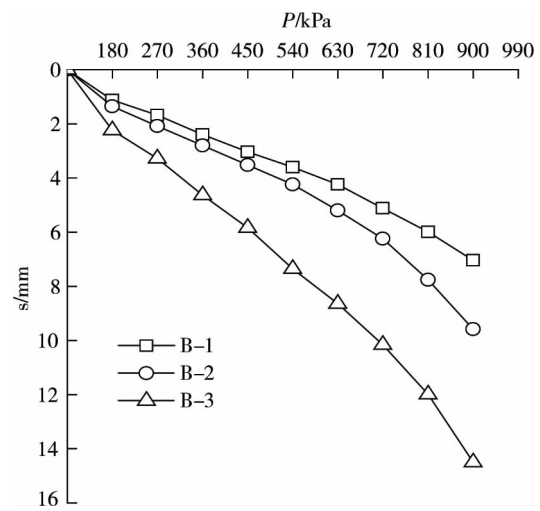


图 4 B 楼 3 个单桩复合地基荷载-沉降曲线

从图 3 和图 4 可以看出,当试验达到最大加载量时,7 根单桩复合地基的 $P-s$ 曲线呈缓变形,趋于 s 型.可将 $P-s$ 曲线变化规律划分为 4 阶段,即压密刺入阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段、破坏阶段. A 楼 4 根单桩复合地基在加载至最大加载量 880 kPa 时,最大沉降量仅为 10.5 mm,曲线也无明显拐点,均未进入破坏阶段,根据规范^[14]要求, A 楼单桩复合地基的极限承载力特征值为 430 kPa. B 楼 3 根单桩复合地基在加载至最大加载量 900 kPa 时,最大沉降量仅为 14.5 mm,曲线也无明显拐点,均未进入破坏阶段,根据规范^[14]的判定条件, B 楼单桩极限复合地基的承载力特征值为 450 kPa,两栋楼复合地基的承载力和变形均满足设计要求,这也表明该短桩复合地基的承载力仍有发挥的余地,7 根单桩复合地基的承载力特征值见表 3.根据钻孔取样结果,桩周土压缩性较高,承载力较低,桩端持力层承载力高,压缩变形小.由此可知,桩顶沉降主要来自桩身压缩,但其变形量较小,桩长 3~8 m 的嵌岩短桩复合地基表现出明显的端承桩的性状,经加固处理后的复合地基具有很大的安全储备且处理加固效果良好,此地基加固方案还可进行进一步的优化设计桩长和桩间距,以节省成本和降低造价.

表 3 静载荷试验结果汇总

测点编号	极限荷载/kPa	复合地基承载力特征值/kPa
A-1	860	430
A-2	860	430
A-3	860	430
A-4	860	430
B-1	900	450
B-2	900	450
B-3	900	450

以 A 楼 4 个测点的 $P-s$ 曲线为例,分析嵌岩短桩复合地基荷载传递机理.复合地基在快速荷载作用下的沉降变化幅度较大,桩顶褥垫层被压密,表明外荷载的加载量级和加载方式对复合地基沉降影响较大,也是 $P-s$ 曲线呈 s 型变化的直接原因^[19].从曲线上可以看出,在静载荷试验加载初期,当荷载较小(172 kPa)时,桩和桩间土未发挥作用,砂垫层承担了全部荷载,其密实度和刚度迅速增加;当荷载增加至 258 kPa 时,由于桩的刚度较大,荷载主要由 CFG 桩桩顶一定范围的桩体承担,桩顶刺入砂垫层,在此过程承压板下沉较快,即复合地基的沉降主要来自砂垫层被压密以及桩体被刺入所产生的变形,此阶段为压密刺入阶段.随荷载的增大,当荷载小于复合地基承载力特征值(430 kPa)时,桩土共同承担上部荷载,但由于桩-土模量差距较大,上部荷载主要由 CFG 桩承担,桩身发生弹性压缩.复合地基沉降变化较缓慢, $P-s$ 曲线段几乎呈直线,弹性工作较明显,阶段为弹性变形阶段.之后随荷载的逐渐变大,上部荷载逐渐传递到桩端以及持力层,并随着传递荷载的增大,使桩端和持力层逐渐产生弹性和塑性变形,致使沉降量的逐渐增大,此阶段为弹塑性变形阶段.

在上部荷载作用下,由于在嵌岩段以上分布的桩周土层压缩性较高,承载力较低,加之地下水位埋深较浅,成桩工艺为非挤土或者部分挤土成桩方式.因为桩长较短,经桩身传递给周围土层的荷载较大,桩间土在较大荷载作用下,桩侧极限摩阻力发挥较快且较小,上部荷载很快传递至桩端持力层,桩端压缩量逐渐增大,但由于桩端持力层为强风化燕山晚期花岗岩,该持力层压缩变形小,工程力学性质较好,可提供足够的桩端阻力,使得该复合地基总沉降量均较小.

3.2 CFG 嵌岩短桩复合地基沉降影响因素分析

通过统计 A, B 楼复合地基单桩的桩长、桩径、嵌岩深度、桩身嵌岩段岩性与复合地基沉降量的变化关系,深入探讨 CFG 嵌岩短桩复合地基的沉降影响因素,统计结果见表 4.

表 4 复合地基沉降量影响因素统计

测点编号	长径比	嵌岩深度/m	地下水埋深/m	最终沉降量/mm
A-1	7.0	0.75	4.15	4.99
A-2	6.6	0.75	4.15	5.85
A-3	11.2	0.75	4.15	8.87
A-4	7.6	0.75	4.15	10.5
B-1	14.6	0.50	7.33	7.04
B-2	14.8	0.50	7.33	9.59
B-3	15.2	0.50	7.33	14.5

统计结果发现,对于 A 楼嵌岩灌注短桩(3~6 m),在该试验场地条件下,当其他条件相同时,桩长越长,复合地基总沉降量越大,桩长增长 60%~67%,沉降量可增长 52%~78%,但对于桩长相近的 A-1, A-2 桩由于岩体的差异性和试验过程中的误差,出现了 A-2 桩沉降位移略大于 A-1 桩的沉降位移;对于 B 楼嵌岩灌注短桩(7~8 m),当其他条件相同时,桩长增长 1%~4%,沉降量可增长 36%~106%,沉降量的增长和桩长增长幅度趋同甚至很大程度上超过其增长幅度,但总沉降量较小,仍满足工程需要.这表明在荷载作用下桩长对嵌岩短桩沉降变形影响较大;B 楼与 A 楼相比,当桩长超过 7 m,桩身弹性压缩占总变形量的比重显著,而当桩长小于 7 m,桩的总变形量较小,桩身弹性压缩量也较小.究其原因,桩端持力层压缩量较小,当桩长较短时,桩身的压缩量也较小.特别地,桩长较短的 4 号测点比桩长相长的 3 号测点的总沉降量要大,可增长 18.4%,比相近桩长的 1 号和 2 号测点大,可增长 110%和 79.5%,这与前面所述的规律不符.究其原因,4 号测点在成桩过程中可能削弱了桩端持力层结构强度,持力层由于赋水性稍好,并且含有风化黏土矿物以及节理、裂隙发育,加之桩位相距较远,持力层中的含水率、黏土矿物含量以及节理、裂隙发育程度的不同,致使持力层的压缩变形量不同,从而导致 4 号测点与 3 号测点沉降量差异较大.

4 结论

1) 在青岛地区应用 CFG 桩处理加固软土地基可取得良好效果,在获得较高地基承载力的同时最大程

度地节约了工程造价,性价比很高,经静载荷试验验证,A楼 CFG 复合地基极限承载力特征值为 430 kPa, B 楼为 450 kPa 均满足设计要求且其承载力仍有发挥余地。

2) 7 根嵌入强风化花岗岩的 CFG 短桩(3~7 m)复合地基 $P-s$ 曲线为缓变形,表现出半刚性端承型桩的特性,其变化过程可划分为 4 个阶段,即压密刺入阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段、破坏阶段,加载方式和加载量对单桩复合地基沉降影响较大。

3) 在荷载作用下,嵌岩 CFG 短桩的沉降变形主要来自桩身的压缩量。在本试验条件下,对于嵌岩灌注短桩(3~6 m),当其他条件相同时,桩长增长 60%~67%,沉降量可增长 52%~78%,对于嵌岩灌注短桩(7~8 m),当其他条件相同时,桩长增长 1%~4%,沉降量可增长 36%~106%,但总沉降量仍较小,不超过 14.5 mm,满足工程变形要求。当桩长超过 7 m,桩身弹性压缩占总变形量的比重显著,而当桩长小于 7 m,桩的总变形量较小,桩身弹性压缩量也较小。

参考文献:

- [1] Zheng G, Jiang Y, Han J, et al. Performance of cement-fly ash-gravel pile-supported high-speed railway embankments over soft marine clay[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2011, 29(2): 145-161.
- [2] 赵明华,刘琴,邹新军. 水泥粉煤灰碎石(CFG)桩复合地基固结分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(9): 1-5.
- [3] 牟洋洋,白晓宇,张明义. 强风化泥岩地基上 CFG 桩复合地基应用与优化[J]. *建筑结构*, 2019, 49(12): 120-124.
- [4] You S, Cheng X, Guo H, et al. In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 79: 23-31.
- [5] 詹云刚. CFG 桩复合地基褥垫层工作性状研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2004(8): 1-3.
- [6] 刘保民,孙明远. 长螺旋钻孔管内泵压 CFG 桩在地基处理中的应用[J]. *建筑科学*, 2005, 21(3): 73-76.
- [7] 王炳龙,杨龙才,周顺华,等. CFG 桩控制深厚层软土地基沉降的试验研究[J]. *铁道学报*, 2006, 28(6): 112-116.
- [8] 徐毅,洪宝宁,符新军,等. CFG 桩复合地基加固高速公路软基的现场试验研究[J]. *防震减灾学报*, 2006, 26(3): 305-309.
- [9] Chen Q, Zhao M, Zhou G, et al. Bearing capacity and mechanical behavior of CFG pile composite foundation[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15: 45-49.
- [10] Yuqin F, Lu Z. The study of mechanism of the lining on CFG pile composite foundation[C]//*Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 899-902.
- [11] 宋荣方,刘成才. 软土中高层建筑长短桩复合地基设计[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(6): 1681-1685.
- [12] 王旭,张延杰,蒋代军,等. 饱和黄土区 CFG 桩与振动沉管碎石桩复合地基承载特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(s2): 1063-1066.
- [13] 刘伍. 某 35 层住宅 CFG 桩复合地基处理可行性分析[J]. *建筑科学*, 2015, 31(11): 98-102.
- [14] 中国建筑科学研究院. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2012.
- [15] 赵明华,雷勇,刘晓明. 基于桩-岩结构面特性的嵌岩桩荷载传递分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(1): 103-110.
- [16] 潘星. CFG 桩复合地基沉降计算探讨[J]. *岩土力学*, 2005, 26(s): 248-251.
- [17] 乔京生,王喜强,牛宝云,等. 基于差异沉降的复合地基沉降计算方法研究[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 22(3): 61-65.
- [18] Zhang C, Jiang G, Liu X, et al. Deformation performance of cement-fly ash-gravel pile-supported embankments over silty clay of medium compressibility: a case study[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(7): 4495-4507.
- [19] 赵幸,赵德富,赵其华,等. CFG 桩复合地基沉降量计算及沉降影响因素探析[J]. *工业建筑*, 2013, 43(s1): 476-479.
- [20] Zheng J J, Abusharar S W, Wang X Z. Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG-lime piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(4): 637-643.