

文章编号: 1674-599X(2020)04-0022-06

高速公路 CFG 桩复合地基振动成型法试验研究

曾伟, 曹锋

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 为证实 CFG 桩加固软土路基的有效性, 以某实际工程为依托, 通过室内试验和现场试验, 对 CFG 桩振动加固软土地基时的施工参数进行研究, 确定最有利的施工参数。试验结果表明: 在室内振动实验时, 当单次振动时间在 160~200 s 时, 干密度可达到较大值, 与现场试验获得的干密度相差约 0.054 g/cm^3 ; 在现场经过 5~6 次碾压之后, 可获得较大的最大干密度约为 2.385 g/cm^3 ; 在经历 160 s 的振动和 5~6 次碾压后, 复合地基的含水率基本不变, 维持在 5% 左右。可为类似工程施工提供参考。

关键词: 高速公路; CFG 桩; 施工; 试验研究

中图分类号: U213.1⁺5

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.004

Experimental study on vibration forming of CFG pile composite foundation in expressway

ZENG Wei, CAO Feng

(Hunan Hengli Construction Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: For confirm the effectiveness of CFG pile to reinforce soft soil roadbed, based on a practical project, through laboratory test and field test, the construction parameters of CFG pile vibration reinforcement soft soil foundation are studied, and the most favorable construction parameters are determined. The test results show that when the single vibration time is 160~200 s, the dry density reaches a higher value, and the dry density difference of the site test is about $0.054 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. After 5~6 times of rolling, the maximum dry density is about 2.385 g/cm^3 . After a certain vibration time (160 s) and rolling times (5~6 times), the moisture content of the composite foundation is basically unchanged. It can provide reference for similar projects.

Key words: expressway; CFG pile; construction; experimental research

高速公路建设日益增多, 面临穿越含有不良地质条件区域的情况也增加。由于高速公路穿越软土地基时, 在交通荷载的作用下, 会出现严重的地基变形, 软土地基承载力无法满足工程安全要求^[1]。因此, 为了缩短工期, 保证工程质量, 在施工建设阶段, 需要对高速公路的软土地基进行处理^[2-3]。CFG(cement fly-ash gravel, 简称为 CFG)桩是由碎石、砂、水泥并掺入粉煤灰拌和而成的水泥粉煤灰碎石桩, 具有强度高、原料便宜、经济效益明显等

特点。CFG 桩可充分利用桩身承载力和桩土间的摩擦力, 将路面的交通荷载传递到深层地基中^[4-6]。施作 CFG 桩有利于排出软土中的气体和水分, 有效改善软土地基的结构, 提高其承载力^[7-10]。目前, 最常用的 CFG 桩复合地基采用振动沉管法, 该方法工序简单, 便于施工。虽然 CFG 桩复合地基已经得到了广泛的应用, 但是由于每个项目所处的工程地质条件不同, 原材料的物理化学性质也有差异。因此, CFG 桩复合地基的施工过程中, 需要

收稿日期: 2020-06-08

作者简介: 曾伟(1989-), 男, 湖南路桥建设集团有限责任公司工程师。

对施工参数进行分析, 才能实现复合地基最优的承载力^[11-13]。本研究以某实际工程为依托, 拟通过室内试验和现场试验, 确定该 CFG 桩复合地基振动成型法施工的最优参数, 以期为类似工程施工提供借鉴。

1 工程概况

某高速公路沿线软土分布广泛、埋深浅、厚度大, 而且不均匀, 最大深度达到 21 m, 力学性能较差。地基的岩土为亚黏土, 深度为 14.5~21.0 m, 塑性指数为 14, 天然重度为 15.9 kN/m³, 孔隙比为 1.25, 塑性指标为 16.2, 压缩模量为 1.73 MPa, 黏聚力为 6 MPa。由于现场施工条件、环境等各因素的影响, 设计桩长为 18 m, 布桩的间距为 1.8 m, 平均设计高度为 4.1 m, 桩直径为 160 mm, “一”字形布置。CFG 桩复合地基技术具有高黏结强度、变形小及工程应用广泛等特点, 处理桥头软基引起的跳车问题效果明显, 具有较好的技术性能和经济效果。因此, 本研究将对 CFG 桩复合地基处理桥头深厚软基层后的沉降变形进行系统分析。CFG 桩复合地基主要包括 CFG 桩、桩间土、褥垫层 3 部分。车辆载荷和上部地基自身重量, 由褥垫层传递给 CFG 桩和桩间土, 如图 1 所示。在软土地基中, 如果不进行地基处理, 因路基材料刚度差异不同和路基土流失失效, 会使路面产生明显的不均匀沉降。如果发生在路桥过渡段, 会诱发行车中出现跳车的现象^[14]。室内试验过程中, 采用室内振动压实机对土样进行单次振动压实实验。其中, 仪器的静压力为 1 900 N, 激振力为 6 800~6 900 N, 振动频率为 28~30 Hz, 仪器如图 2 所示。

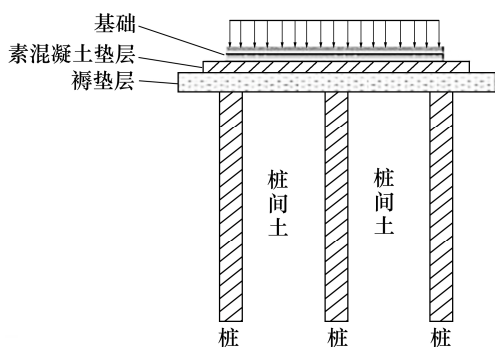


图1 CFG桩复合地基原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of CFG pile composite foundation



图2 室内振动压实机

Fig. 2 Indoor vibratory compactor

2 CFG 桩复合地基施工确定参数

路基质量的好坏直接影响到整个公路的品质。为了提高路基的强度和稳定性, 施工线路穿越不良地质时, 必须对路基进行充分处理, 提高其承载力。CFG 桩复合地基技术能够有效改善地基的承载力, 在 CFG 桩复合地基振动成型施工工艺中, 干密度和含水率是非常关键的 2 个参数。本研究主要对这 2 个参数的影响因素进行室内和现场试验。主要试验目的有:

1) 分析室内试验干密度与现场试验干密度之间的关系, 以干密度为指标, 确定现场施工的最优碾压遍数。

2) 采用设备开展室内试验, 研究不同含水率和干密度之间的关系。

2.1 试验步骤

本试验含有现场试验和室内试验, 其中, 在 K113+050~K112+860 段和 K112+800~K112+655 开展试验, 为了排除试验仪器带来的偶然性, 同时对试验仪器进行评价, 采用 20 t 以上的振动压路机, 充分发挥压实设备的效率, 提高基层压实度。室内试验在 2 个标段开展对比实验。

现场试验内容为: K113+050~K112+860 段, 为了研究压实遍数对含水率和干密度的影响, 该标段可以分为 4 段, 具体为: 桩号 K113+050~K113+010 段, 振动 5 遍; 桩号 K113+010~K112+980 段, 振动 4 遍; 桩号 K112+980~K112+940 段, 振动 6 遍; 桩号 K112+940~K112+860 段, 振动 7 遍。开始静压和结束时的双钢轮和胶轮压路机的 2 遍光面不计入压实遍数。碾压时, 压路机重叠 1/2。K112+

800~K112+665段,为了研究压实遍数对含水率和干密度的影响,按不同压实遍数分成6段,碾压方法与K1130+050~K112+860段一致。其中:桩号K112+800~K112+765段,振动1遍;桩号K112+765~K112+730段,振动2遍;桩号K112+730~K112+710段,振动3遍;桩号K112+710~K112+690段,振动4遍;桩号K112+690~K112+670段,振动5遍;桩号K112+670~K112+655段,振动6遍。现场压实结束后,测定不同试验段在不同压实遍数下的混合料密度。再对混合料进行水洗筛分,检测其级配是否满足设计。最后,通过现场取样,采用振动成型机测定样品的最大干密度。

室内试验内容:在这2个试验段范围内取样,通过设计配合比,确定集料组成比例;采用相同的混合料,开展室内振动成型试验,测定试样干密度和含水率。

2.2 试验结果分析

2.2.1 筛分试验结果

桩号K112+800~K112+655段,现场试验的筛分试验结果见表1。由表1可知,现场混合料的配比符合设计级配,如图3~4所示,但在0.075 mm范围的级配数略大于设计级配。

表1 现场试验的筛分试验结果

Table 1 Screening results of field test

筛孔尺寸/mm	设计级配/%	筛分结果	
		①	②
31.500	100	100.0	100.0
26.500	90~100	94.6	94.5
19.000	65~86	79.4	80.4
9.500	38~58	53.8	52.8
4.750	22~32	31.3	30.0
2.360	16~28	22.0	17.5
0.600	8~15	11.5	9.7
0.075	0~3	4.8	4.4

注:①为现场试验一;②为现场试验二。

2.2.2 干密度的影响因素分析

K113+050~K112+860段和K112+800~K112+655段分别命名为试验一和试验二。2段现场试验现场采样品如图5所示。开展现场试验和室内振动压实试验,单次振动时间与干密度试验结果如图6所示。从图6中可以看出,试验一和试验二研究结

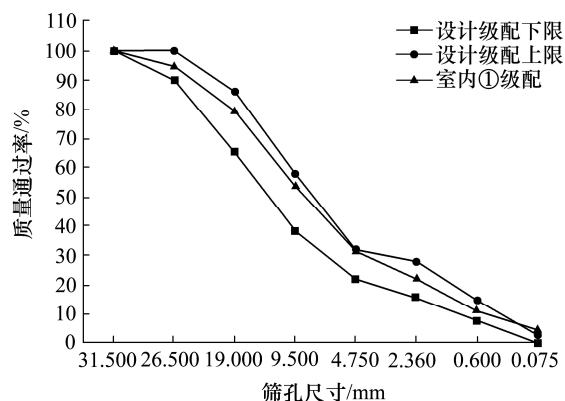


图3 K113+050~K112+860段级配曲线

Fig. 3 Segment gradation curves at the position of K113+050~K112+860

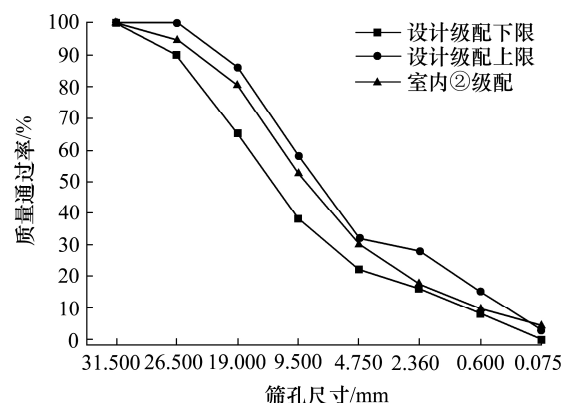


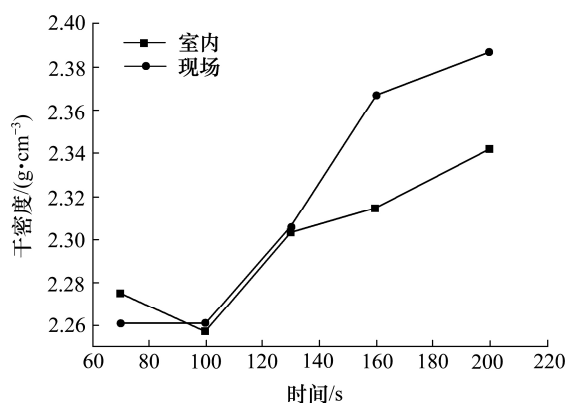
图4 K112+800~K112+655段级配曲线

Fig. 4 Segment gradation curves at the position of K112+800~K112+655

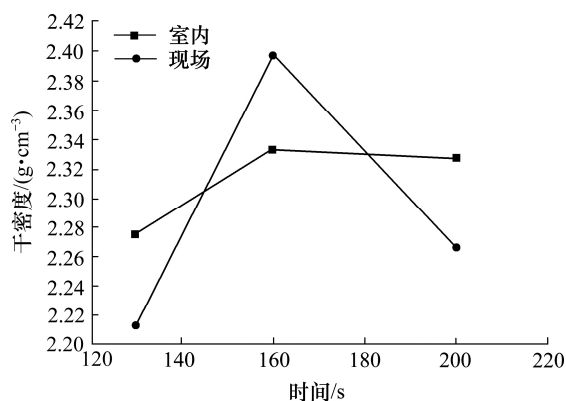


图5 干密度现场取样测试照片

Fig. 5 Field sampling of dry density



(a) 试验一



(b) 试验二

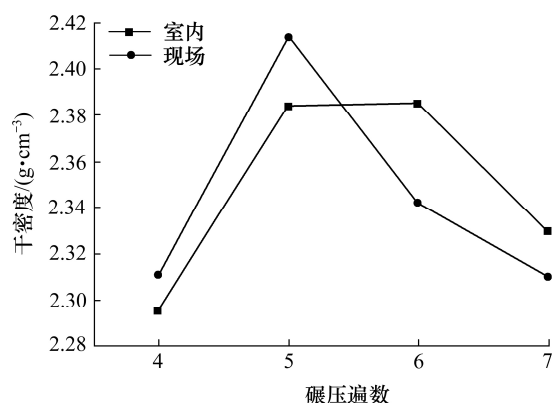
图6 振动时间与干密度的关系

Fig. 6 Relationship between vibration time and dry density

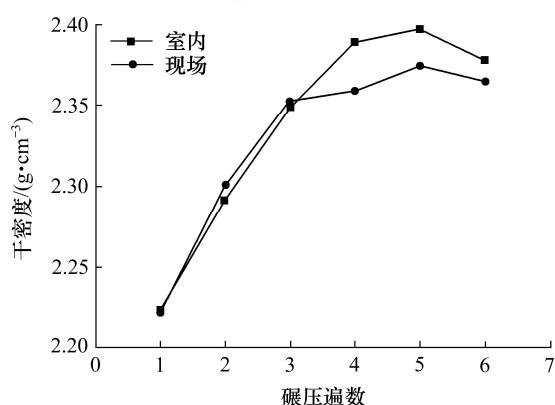
果的变化趋势略有不同。试验一的试样随着压实时间的增加,干密度呈先增加后降低趋势。经过 200 s 后,室内振动试验得到最大干密度约为 2.343 g/cm³。试验二的试样随着压实时间的增加,干密度也随之增加。振动时间为 200 s 时,室内振动试验得到最大干密度,约为 2.343 g/cm³,现场试验结果为 2.381 g/cm³。振动压实试验表明:在 2 次试验中,当单次振动时间超过 160 s 时,样品的干密度达到一个较大的值。因此,建议在实际施工中将单次振动时间设置为 160~200 s。

干密度室内试验结果与现场试验结果基本一致,均随着振动时间的增加呈现先增大后降低趋势。其中,现场试验整体结果略大于室内试验。

碾压次数与干密度现场试验和室内试验结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,试验一的试样随着压实时间的增加,干密度先增加后降低,在碾压第 5 次、第 6 次出现干密度的峰值。其中,现场试验结果为 2.38 g/cm³,室内试验结果为 2.41 g/cm³。试验二的试样也表现出同样的规律,随着碾压遍数的



(a) 试验一



(b) 试验二

图7 碾压遍数与干密度的关系

Fig. 7 Relationship between the number of milling times and dry density

增加,干密度先增加后降低,在碾压第 5 次出现干密度的最大峰值,现场试验约为 2.397 g/cm³,室内试验结果为 2.382 g/cm³。

振动压实试验表明:当碾压遍数为 5~6 次时,路基的干密度达到最大值,因此,在实际的施工中,建议现场的碾压边数为 5~6 次。

2.2.3 含水率的影响因素分析

2 段试验段进行现场采样后,并开展现场试验和室内振动压实试验,振动时间与含水率试验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,在试验一中,含水率随着压实时间的增加,先增加后不变,在 160 s 后达到稳定。在试验二中,含水率随着振动 160 s 后,含水率保持稳定。

碾压遍数与含水率现场试验结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,试验一,随着碾压遍数的增加,室内含水率不变,现场试验含水率逐渐增加趋于平缓。试验二,随着压实时间的增加,含水率在碾压

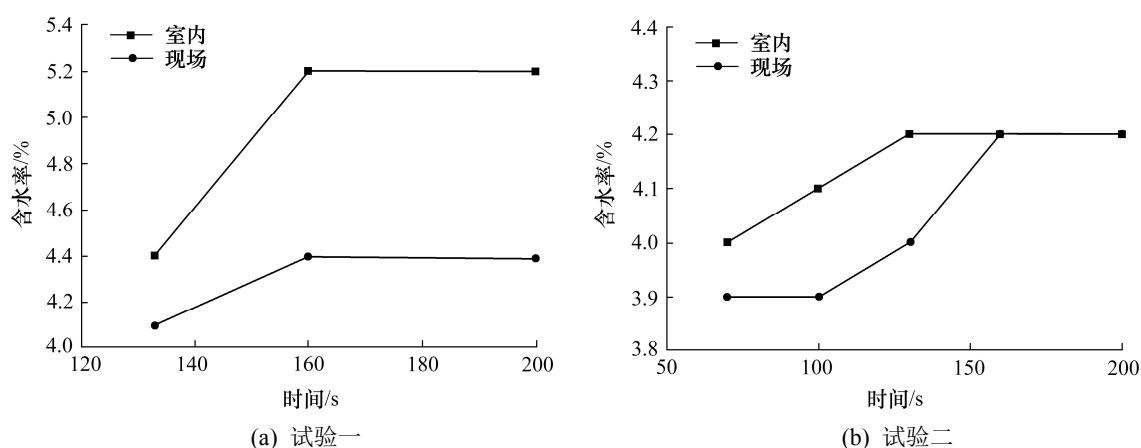


图 8 振动时间与含水率的关系

Fig. 8 Relationship between vibration time and moisture content

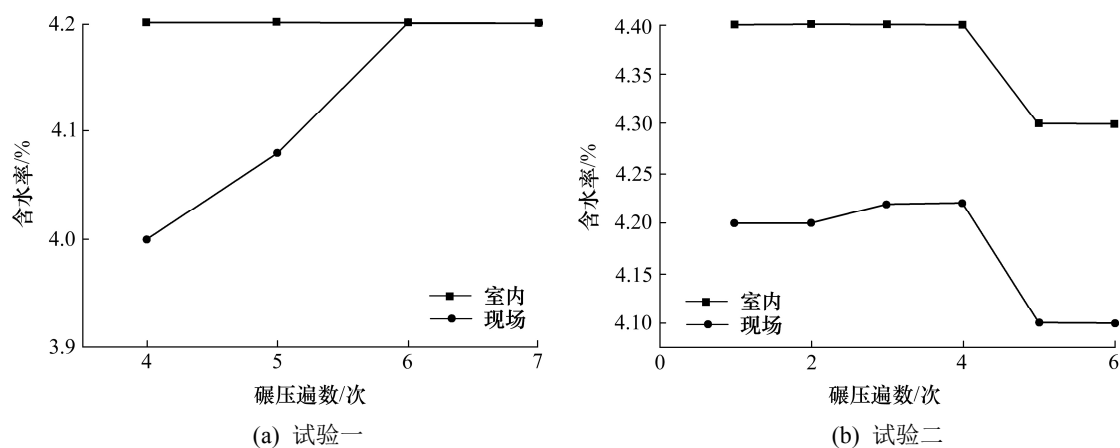


图 9 碾压遍数与含水率的关系

Fig. 9 Relationship between the number of rolling times and moisture content

第 4 次时,开始略有下降。总体而言,在经历 160 s 振动时间和碾压 5 次后,含水率不变,维持在 5%。因此,更加进一步验证了振动时间维持在 160 s 和碾压次数为 5 时,可获得最佳含水率和最大干密度。

3 结论

以某工程为依托,结合室内试验和现场试验,对 CFG 桩振动成型法的相关施工参数进行了研究,得到的结论为:

1) 一定级配设计下,室内试验与现场试验的干密度随着振动时间增加的变化趋势一致。当单次振动为 160~200 s 时,干密度达到一个较大的值;当碾压 5~6 次之后,路基的干密度达到最大值。因此,建议现场碾压遍数为 5~6 次,振动时间为 160~200 s。

2) 室内试验和现场试验均表明经历 160 s 振动

和碾压 5 次后,含水率不变,维持在 5%。因此,更进一步验证了振动时间维持在 160 s 和碾压次数为 5 时,可获得最佳含水率和最大干密度。该 CFG 桩复合地基振动成型法施工工艺的研究结果,可为类似工程施工提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 冯仲仁,朱瑞赓.我国高速公路软基处理研究的现状与展望[J].武汉理工大学学报,2002,24(1):78-80.(FENG Zhong-ren,ZHU Rui-zhi.Status and prospect of the improvement of soft soil on expressway in china[J].Journal of Wuhan University of Technology, 2002,24(1): 78-80.(in Chinese))
- [2] 潘瑞春,黄瑞章,周新年,等.道路工程软土地基处理方案选择研究进展[J].公路交通科技:应用技术版,2012(10): 23-26. (PAN Rui-chun, HUANG Rui-zhang, ZHOU Xin-nian, et al. A study on the selection of soft foundation

- treatment scheme for road engineering[J]. Highway Traffic Technology: Applied Technology Edition, 2012(10):23-26.(in Chinese))
- [3] 王大阳,彭学良.浅谈复合地基处理在高速公路软基处理中的应用[J].科技促进发展,2010(S1):134.(WANG Da-yang, PENG Xue-liang. Application of composite foundation treatment in soft foundation treatment of expressway[J]. Science & Technology for Development, 2010(S1):134.(in Chinese))
- [4] 旷振华,李彬.CFG桩复合地基加固软土地基的原理与施工方法[J].湖南交通科技,2003,29(2):4-6.(KUANG Zhen-hua, LI Bin.Principle and construction method of CFG pile composite foundation for strengthening soft soil foundation[J]. Hunan Communication Science and Technology,2003,29(2):4-6.(in Chinese))
- [5] 刘文足,罗玉刚.高速公路软土路基处治中CFG桩复合地基的应用[J].西部交通科技,2019(11):38-42.(LIU Wen-fu, LUO Yu-gang. Application of CFG pile composite foundation in soft soil subgrade treatment of expressway[J]. Western China Communications Science & Technology, 2019(11):38-42.(in Chinese))
- [6] 秦建庆,叶观宝,费涵昌.水泥土桩复合地基桩土分担荷载的试验研究[J].工程勘察,2000(1):32-34.(QIN Jian-qing, YE Guan-bao, FEI Han-chang. Test of shared loading between pile and soil in composite ground of cement-soil piles[J]. Geotechnical Investigation & Survey, 2000(1): 32-34. (in Chinese))
- [7] 邓跃光,黄荣.CFG桩复合地基的原理和设计[J].地质灾害与环境保护,2002,13(3):69-72.(DENG Yue-guang, HUANG Rong.The theory and design of CFG composite foundation[J].Geological Hazards and Environmental Protection,2002,13(3):69-72.(in Chinese))
- [8] 彭波.CFG桩在高速公路桥头深厚软土处理中的应用[J].湖南交通科技,2013,39(2):42-45.(PENG Bo.The application of CFG pile in the treatment of deep soft soil at highway bridgehead[J].Hunan Communication Science and Technology,2013,39(2):42-45.(in Chinese))
- [9] 陈东佐,梁仁旺.CFG桩复合地基的试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(4):71-74.(CHEN Dong-zuo, LIANG Ren-wang. Experimental study on CFG pile composite foundation[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(4): 71-74.(in Chinese))
- [10] 李传华.CFG桩在桥头软基处理中的应用[J].湖南交通科技,2016,42(4):58-61.(LI Chuan-hua.Application of CFG pile in soft foundation treatment of bridgehead[J]. Hunan Communication Science and Technology,2016, 42(4):58-61.(in Chinese))
- [11] 任鹏,邓荣贵,于志强.CFG桩复合地基试验研究[J].岩土力学,2008,29(1):81-86.(REN Peng,DENG Rong-gui, YU Zhi-qiang. Experimental research on composite foundations with CFG piles[J].Geotechnical Mechanics, 2008,29(1):81-86.(in Chinese))
- [12] 佟建兴,胡志坚,闫明礼,等.CFG桩复合地基承载力确定[J].土木工程学报,2005,38(7):87-91.(TONG Jian-xing, HU Zhi-jian, YAN Ming-li, et al. Identification of the bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 87-91. (in Chinese))
- [13] 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.(WANG Bing-long, YANG Long-cai, ZHOU Shun-hua, et al. Experimental study on the settlement control of high-speed railway subgrade over deep soft clay reinforced by CFG piles[J]. Journal of Railways, 2006, 28(6):112-116.(in Chinese))
- [14] 刘明.CFG桩复合地基处理桥头深厚软基的沉降变形分析[J].西部交通科技,2019(10):110-113.(LIU Ming. settlement deformation of deep soft foundation at bridge head treated with CFG pile composite foundation[J]. Western Transportation Technology, 2019(10): 110-113. (in Chinese))