

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.01.018

CFG 桩复合地基加筋褥垫层作用机理数值分析

王勇¹, 蔡智², 屈洋¹, 黄立夫², 王鹏¹

(1. 中建五局土木工程有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 针对福建平潭万北路市政道路工程土工格栅加筋褥垫层是否能够改善 CFG 桩复合地基在路堤荷载作用下的沉降及桩土应力分配的问题, 提出了基于有限差分软件 FLAC^{3D} 的 CFG 桩复合地基的数值模拟。应用 FLAC^{3D} 软件进行 CFG 桩单桩竖向抗压静载试验模拟, 并将数值模拟所得的 $Q-s$ 曲线与现场试验所得进行了对比, 对路堤荷载下有无土工格栅对褥垫层加筋处理两种工况下的复合地基进行了桩身应力及沉降的分析。结果表明, 数值模拟与现场试验所得的单桩竖向抗压静载试验 $Q-s$ 曲线吻合较好, 证明了该模型具有一定的合理性; 土工格栅加筋褥垫层通过增大桩身受力来改善地基沉降, 但改善效果不明显, 主要起提高安全储备的作用。

关键词: CFG 桩复合地基; 土工格栅加筋褥垫层; 桩体应力分布; 沉降变形; 数值模拟

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)01-0096-05

Numerical Analysis of Geo-grid Reinforced Cushion of CFG Pile Composite Foundation

WANG Yong¹, CAI Zhi², QU Yang¹, HUANG Lifu², WANG Peng¹

(1. CCFEB Civil Engineering Co. Ltd., Changsha, Hunan 410004, China;

2. College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Aiming at the problem of whether geo-grid reinforced cushion can improve the settlement and distribution of pile-soil stress of CFG pile composite foundation under embankment load in municipal road engineering of Wanbei Road in Pingtan, Fujian Province, the numerical simulation of CFG pile composite foundation based on the finite difference software & FLAC^{3D} was conducted. The numerical simulation of vertical compressive load test of single CFG pile was carried out with FLAC^{3D} software, and the $Q-s$ curve of vertical compressive load test of single pile obtained by numerical simulation with FLAC^{3D} was compared with which obtained by field test. In addition, the analysis of the pile body stress and settlement deformation of CFG pile composite foundation was performed under the condition that the cushion is reinforced by geo-grid or not. The results show that the $Q-s$ curve of vertical compressive load test of single pile obtained by numerical simulation with FLAC^{3D} agree well with the field test ones, which proves that the model has certain rationality. The geo-grid reinforced cushion can improve the settlement of foundation by increasing the pile body force, but the effect is inconspicuous, however the safety margin of composite foundation was improved.

Keywords: CFG pile composite foundation; geo-grid reinforced cushion; stress distribution of piles; settlement deformation; numerical simulation

在我国东部沿海区域进行市政道路工程时, 常采用 CFG 桩处理典型海相深厚软土地基^[1]。在这种不良地质条件下为保证道路的质量, 对 CFG 桩复合地基承载能力及沉降变形的要求较高^[2]。使用土工格栅对复合地基褥垫层进行加筋处理, 由于土工

格栅耐腐蚀, 与碎石具有良好的嵌固效应, 且在一定范围的变形量内仍具有很高的抗拉强度, 可使在满足碎石-土工格栅协调变形以向桩土传递载荷的基本作用下, 将上部荷载均化分配, 从而达到减小软土地基沉降及桩土差异沉降的目的^[3]。同时, 路堤土

拱效应也与加筋褥垫层的性质相关,通过设置加筋褥垫层可以影响荷载在土拱中的传递效应^[4]。

目前,土工格栅加筋褥垫层已被广泛应用于工程之中,已有国外学者通过数值计算与试验相结合的方法对加筋路堤进行研究^[5-7]。国内学者采用现场试验、室内模型试验及数值模拟等方法在桩土沉降、桩土应力方面研究土工格栅的加筋效果。其中研究结果表明,土工格栅的加筋效果与土工格栅刚度、上覆荷载紧密相关,而土工格栅层数的增大不足以改善加筋效果^[8]。大部分研究成果显示,加筋褥垫层效果明显,减少桩土差异沉降明显,桩土应力分配优化^[9-12];同时,部分学者认为,土工格栅加筋效果不显著,而主要起安全储备的作用^[13-14]。

本文依托福建平潭综合实验区万北路软土地基处理工程,在分析对比 FLAC^{3D}模拟与现场试验的单桩竖向抗压荷载试验 $Q-s$ 曲线以验证采用 FLAC^{3D} 数值模型分析 CFG 桩复合地基的可靠性的基础上,分别模拟有无土工格栅对褥垫层加筋处理两种工况下,CFG 桩复合地基在路堤荷载作用下的桩土承载特性及沉降变形,通过对比二者的模拟结果以验证土工格栅的加筋效果,并分析土工格栅加筋褥垫层的作用机理。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

福建平潭综合实验区万北路软土地基处理工程线路经过的场地原始地貌主要为残坡积台地及海积平原,场地现状多为鱼塘、农田及菜地,地势较平坦,地面标高约为 $-0.93\text{ m} \sim 6.70\text{ m}$ 。

据现场钻探揭露,场地地层结构自上而下分述如下(见图 1)。

① 杂填土(耕植土):松散-稍密,工程性质不均匀,道路沿线大部分路段均有分布,承载力低,工程性质差,须进行清除处理;

② 中细砂:稍密,局部松散、中密,层厚较小,个别钻孔可能发生轻微液化,工程性质较均匀,承载力低,工程力学性质较差;

③ 淤泥:流塑,层厚较小,属高压缩性土层,承载力低,工程力学性质差;

④ 细中砂:稍密、中密,局部松散,个别钻孔可能发生轻微液化,承载力中等,工程力学性质较好;

⑤ 淤泥质土:流塑,层厚较大,属高压缩性土层,承载力低,工程力学性质较差;

⑥ 粉质黏土:可塑,工程性质较均匀,承载力中等,工程力学性质较好。

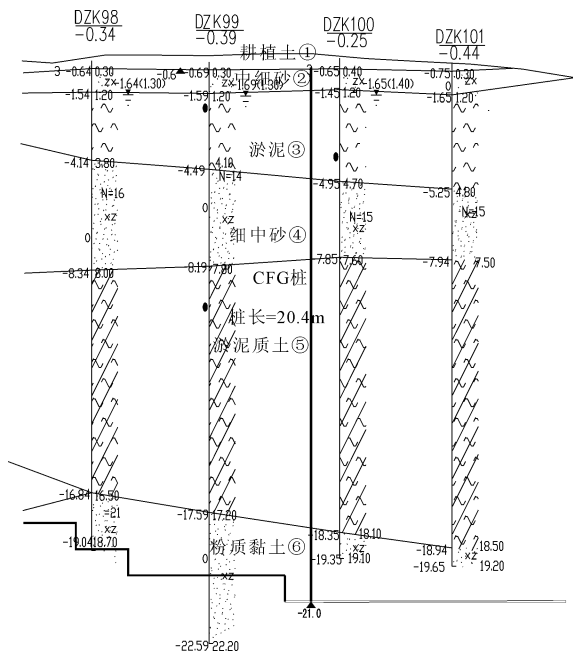


图 1 试验段工程地质剖面图(单位:m)

1.2 软土地基处理方案

该工程采用 CFG 桩对软土地基进行处理,具体处理方案如图 2 所示。CFG 桩桩径为 500 mm,采用正四边形布置,桩身混凝土强度等级 C15,桩间距为 2 m,桩长为 21.03 m ~ 22.33 m,不设桩帽,桩端持力层为⑥粉质黏土。桩顶铺设 0.6 m 厚砂石垫层及两层土工格栅,一层铺设于桩顶,一层铺设于垫层中间,且土工格栅回折长度不小于 1.5 m(见图 3)。

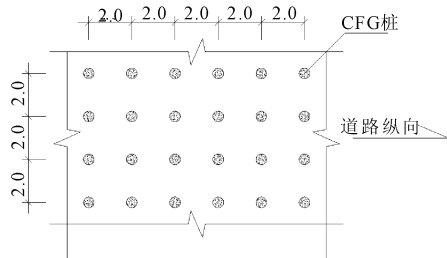


图 2 CFG 桩平面布置图(单位:m)

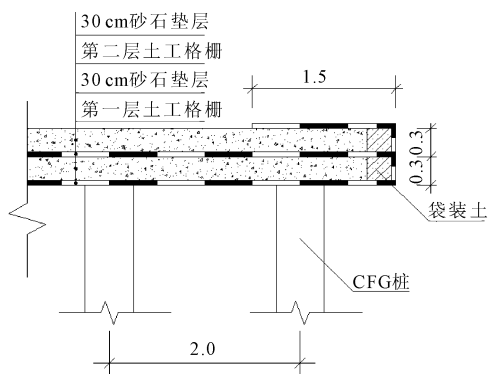


图 3 土工格栅加筋褥垫层示意图(单位:m)

2 单桩竖向抗压静载试验数值模型验证

2.1 单桩静载试验的数值模拟

模拟时不考虑群桩效应,单桩静载试验轴对称受力,选择 1/2 模型进行模拟,运用 FLAC^{3D} 进行数值模拟时所建立的计算模型及其网格、计算坐标系与模型尺寸如图 4 所示。土体采用 Mohr-Coulomb 模型,CFG 桩采用弹性模型,桩土接触面采用库伦滑动模型。边界条件为顶部边界为自由边界、侧面边界为水平向滑动支座、底面边界为竖向滑动支座。CFG 桩轴线方向沿 Z 轴负方向,整个模型尺寸为 60 m × 30 m × 42 m。

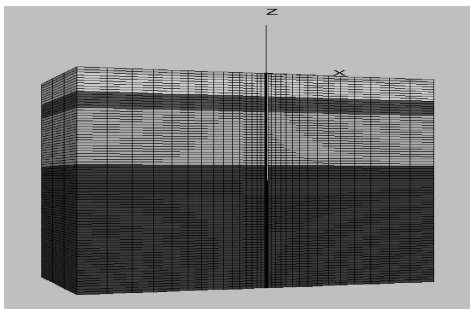


图 4 单桩静载试验数值模型图

土层分布、CFG 桩材料参数根据试验段勘察、检测结果选定,而勘察报告提供的参数有限^[15],需要根据地层描述结合地质勘查资料及相关工程资料综合选取各地层物理参数,如表 1 所示。并在确定泊松比及弹性模量的基础上根据下列公式确定数值模拟所需剪切模量及体积模量:

$$K = E/3(1 - 2\nu) \quad (1)$$

$$G = E/2(1 + \nu) \quad (2)$$

表 1 数值模拟参数

名称	埋深 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$
②中细砂	0.0~1.0	1850	12.000	0.33	1.0	25.0
③淤泥	1.0~4.5	1750	2.206	0.30	14.2	11.9
④细中砂	4.5~7.5	1900	18.000	0.25	1.0	30.0
⑤淤泥质土	7.5~18.0	1742	1.916	0.33	10.0	8.5
⑥粉质黏土	18.0~42.0	1917	4.018	0.30	34.1	16.2
CFG 桩		2400	12.000	0.16		

2.2 现场试验与数值模拟 $Q-s$ 曲线比较

现场试验与数值模拟结果见图 5。

由图 5 可知现场试验与数值模拟的单桩竖向抗压荷载试验 $Q-s$ 曲线均呈缓变型,在加载前期斜率(应力沉降比)较大,此时土体处于弹性阶段;随着

加载的继续, $Q-s$ 曲线斜率逐渐减小,此时土体处于塑性阶段,且现场试验与数值计算的 $Q-s$ 曲线结果吻合度较高。这说明,模型土体采用 Mohr-Coulomb 模型是合理的,采用 FLAC^{3D} 进行桩土力学分析计算结果是可信的。

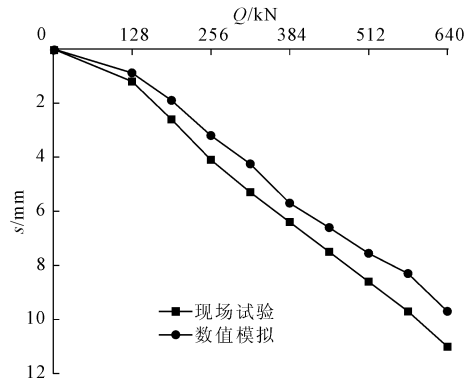


图 5 现场试验与数值模拟结果的单桩静载试验 $Q-s$ 曲线

3 土工格栅加筋褥垫层效果分析

试验段在 CFG 桩打设完毕后,在桩顶分层布设土工格栅(两层)与碎石垫层。土工格栅对褥垫层加筋处理后填筑路堤。利用 FLAC^{3D} 分别模拟天然软土地基、无土工格栅加筋褥垫层及有土工格栅加筋褥垫层复合地基在路堤荷载作用下的受力变形沉降。以无土工格栅加筋褥垫层为工况 1,以有土工格栅加筋褥垫层为工况 2。

3.1 土工格栅加筋褥垫层数值模型

CFG 桩软土地基处理路段足够长,模型可采用单桩宽度进行 CFG 桩复合地基在路堤荷载下的应力及变形特征。路基土、碎石垫层及路堤填土采用 Mohr-Coulomb 本构模型,CFG 桩采用 Elastic 本构模型,土工格栅采用 FLAC^{3D} 中自带的 Geogridsel 单元进行数值模拟。路基土体表面与碎石垫层采用 attach 进行网络连接。材料参数选取与上述单桩竖向抗压承载力数值模拟中各材料参数选取原则相同。

建立模型的几何参数如图 6 所示。模型边界条件为底部采用位移边界条件(包括水平与竖直方向),侧面采用水平方向位移约束,选择 1/2 模型进行计算。其中路堤高度为 3 m,宽度为 23 m,坡度比为 1:1.5,分三层填筑,每层 1 m。为避免边界效应的影响,数值模型在 X 方向取 47 m,约为 4 倍群桩总宽度,在 Z 方向取 42 m,约为 2 倍桩长,模型具有 46 120 个单元及 55 810 个节点,网格划分如图 7 所示。由于所取的边界条件为完全侧限条件,与现实有一定出入,数值模拟结果较实际偏小。

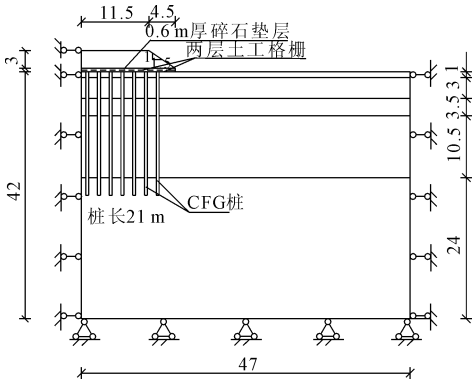


图 6 数值模型的尺寸及边界条件(单位:m)

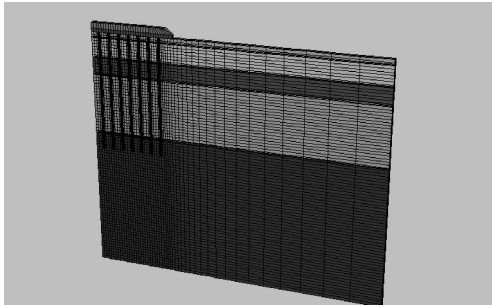


图 7 网格划分模型

考虑 CFG 桩复合地基实际施工情况, (1)赋予处于不同土层的桩体段以该层土体的材料参数,模拟初始应力平衡场; (2)赋予桩体其真实的材料参数并计算至平衡以模拟成桩过程,将位移场置零; (3)自下而上分别填筑褥垫层,分三级在褥垫层上填筑

路堤,每一级计算完毕后再填筑计算下一级路堤荷载,直到填筑完毕,其中褥垫层中自下而上分层铺设土工格栅与碎石,其中路堤材料参数如表 2 所示,土工格栅参数如表 3 所示。

表 2 路堤材料参数

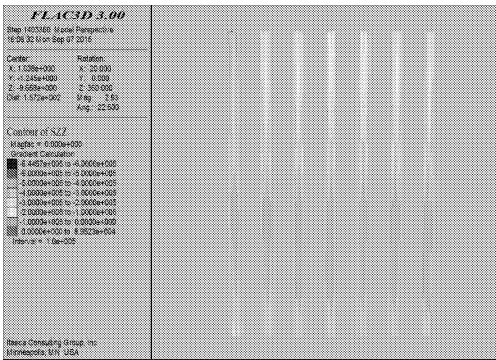
材料类别	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
碎石垫层	20	60.0	0.26	1	40
路堤填土	2000	30.0	0.27	20	28

表 3 土工格栅参数

厚度 /mm	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	黏结摩擦角 /($\text{°})$	刚度 /MPa
5	210.0	0.33	8	23	2.3

3.2 桩身应力分析

图 8(a)、图 8(b)分别反映工况 1 与工况 2 在填筑 3 m 路堤完毕后 CFG 桩在垂直方向的应力分布,由图 8 可见工况 2 的桩身应力值较工况 1 的桩身应力值大,而且分布也更均匀。与未采用土工格栅加筋处理相比较,褥垫层处采用土工格栅加筋处理后,桩身的垂直方向应力增大,且土工格栅加筋褥垫层下,CFG 桩群的垂直应力趋向均匀,工况 1 桩身垂直最大应力为 644.67 kPa,工况 2 桩身垂直最大应力为 754.67 kPa,增大 17.06%。



(a) 工况1CFG桩桩身应力图(填筑3m后)



(b) 工况2CFG桩桩身应力图(填筑3m后)

图 8 CFG 桩桩身应力图(填筑 3 m 后)

3.3 沉降分析

图 9(a)、图 9(b)、图 9(c)分别反映在三级路堤荷载作用下天然地基、工况 1 与工况 2 路基顶面垂直方向位移,由图 9 可见在路堤中线处路基顶面的沉降最大,而项目中采用 CFG 桩处理软土地基的效果较好,在 3 m 路堤填筑完毕时最大沉降减小 34.8%,且沉降均匀。工况 1 与工况 2 在路堤荷载下路基顶面沉降呈凹凸状,符合复合地基沉降规律,

同时,虽然二者的沉降差值很小,但是在三级路堤荷载下工况 1 与工况 2 的沉降差平均值比例为 1:5.6,可知在路堤荷载较小时,土工格栅主要起安全储备的作用,随着路堤继续填筑,土工格栅随着路堤荷载增加加筋效果逐渐凸显。

3.4 土工格栅加筋褥垫层作用机理分析

通过在各级路堤荷载下对 CFG 桩桩身垂直应力及路基顶面垂直位移进行分析可知:

(1)在路堤刚开始填筑时,路堤荷载较小,路基表面的沉降较小,土工格栅受拉变形不大,未体现很好的均化荷载的效果,此时土工格栅更多的起安全储备的作用;

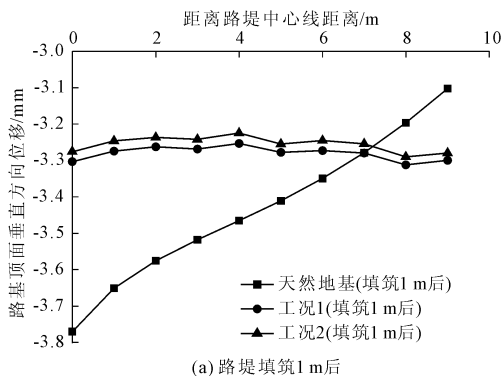
(2)随着路堤继续填筑,路堤荷载增大,路基表面的沉降增大,土工格栅受拉变形,将更多的上部荷载传递给桩体,从而使桩间土承载减少,土体沉降随之减少,从而达到减少复合地基桩土差异沉降的效果。

(2)土工格栅加筋褥垫层对改善桩土受力作用明显,而对减少沉降变形意义不大,相比于工况 1 而言,工况 2 各点沉降减小范围为 0~0.3 mm,沉降改善效果不明显。工况 1 下 CFG 桩桩体承载力高于工况 2,且随着路堤分级填筑施工,该差值有增大趋势,这是由于在路堤荷载作用下,土工格栅受拉使桩身承载加大,减少桩间土的应力分配,达到桩土均化受力,减少桩土差异沉降的目的。

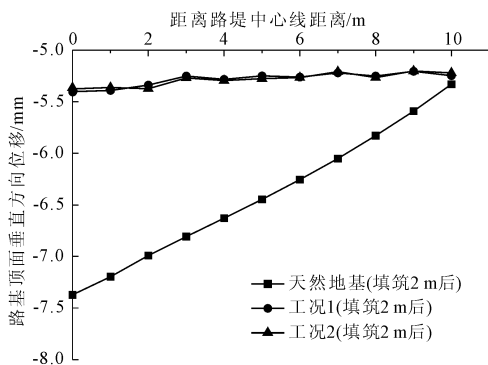
(3)对本工程而言,工况 1 的桩土应力分布与沉降变形相较工况 2 而言有所改善,但改善效果不大。这两方面原因:CFG 桩桩身长,与桩周土体接触效果较好且布桩较密;上部荷载(路堤荷载)较小,不能很好发挥土工格栅特性。

参考文献:

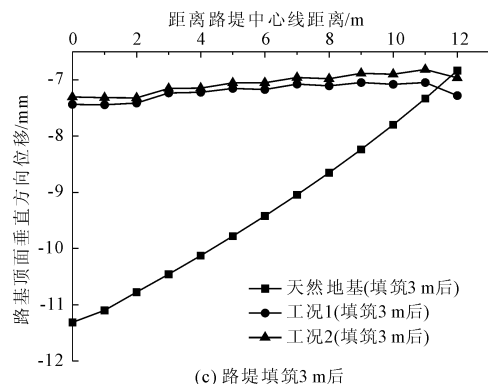
- [1] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.
- [2] 刘小高.市政道路施工海相深厚软土组合型地基处理技术[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):78-82.
- [3] 贾敏才.超高无面板式土工格栅加筋路堤现场试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(12):2220-2225.
- [4] 徐光黎.现代加筋土技术理论与工程应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2004:12-16.
- [5] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 2002,128(1):44-53.
- [6] Sharma J S, Bolton M D. Centrifugal and numerical modeling of reinforced embankments on soft clay installed with wick drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001,(2):23-44.
- [7] Sharma J S, Bolton M D. Centrifuge modeling of an embankment on soft clay reinforced with a geogrid[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996(1):1-17.
- [8] 何杰.软土地基上加筋碎石垫层工作性状试验研究[J].湖南工业大学学报,2014,28(5):17-21.
- [9] 晏莉.土工合成材料处治老路路基拓宽的数值分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1670-1675.
- [10] 谭慧明.桩承加筋路堤中褥垫层对地基沉降的影响分析[J].路基工程,2008(3):27-28.
- [11] 崔激.水泥土桩联合土工格栅复合地基的离心模型试验研究[J].岩土力学,2008,29(5):1315-1319.
- [12] 陈宏伟.桩-筏(网)复合地基桩土应力比现场测试研究[J].水文地质工程地质,2014,41(6):63-69.
- [13] 王建.土工格栅在CFG桩复合地基的应用与有限元分析[J].中国港湾建设,2012(5):11-13.
- [14] 王寒冰.桩网复合地基土拱效应及土工格栅加筋数值分析[D].成都:西南交通大学,2011.
- [15] 于丽鹏.基于FLAC3D模拟的土体弹性模量取值分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):162-166.



(a) 路堤填筑1 m后



(b) 路堤填筑2 m后



(c) 路堤填筑3 m后

图9 路堤荷载下路基顶面垂直方向位移

4 结论

(1)CFG桩复合地基能够显著减少海相深厚软土地基在路堤荷载作用下的沉降变形,按照软土地基处理方案,在路堤中心最大沉降变形处,相较于天然地基位移减少50%以上,从而使场地承载力满足施工要求。