

铁路高填方 CFG 桩复合地基沉降分析

彭仪普, 陈立, 于风晓, 谢文都

(中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

摘要 目的 研究高填方 CFG 桩复合地基的沉降变形规律, 为同类型工程项目的施工提供参考。方法 以新建长株潭城际铁路与长石铁路联络线 CSLXZQ-1 标高填方 CFG 桩复合地基工程为背景, 采用 ABAQUS 软件建立高填方 CFG 桩复合地基三维模型, 针对该工程路堤填筑高度相对较高的情况, 采用“生死单元”方法模拟高填方路堤的分层填筑过程, 并将模拟计算结果与沉降实测结果进行对比研究。结果 随着高填方 CFG 桩复合地基桩长、桩径、垫层厚度分别增大 100%、33.3%、66.6%, 桩间距减少 40% 时, 复合地基沉降量分别减少 63.2%、46.9%、7.9%、61.3%。结论 在数值模拟中采用“生死单元”方法分级加载来模拟高填方路堤荷载, 与实测结果更加吻合。

关键词 CFG 桩; 高填方路堤; 数值模拟; 地基沉降; 地基处理

中图分类号 TU375 文献标志码 A

Settlement Analysis of High-fill CFG Pile Composite Foundation for Railroad

PENG Yipu, CHEN Li, YU Fengxiao, XIE Wendu

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, China, 410075)

Abstract: The settlement deformation law of high fill CFG pile composite foundation is studied to provide reference for the construction of the same type of project. Based on the CSLXZQ-1 elevation fill CFG pile composite foundation project of the new Changsha-Zhuzhou-Xiangtan intercity railway and the Changsha-Shijiazhuang railway connection line, the three-dimensional model of high fill CFG pile composite foundation was established by ABAQUS software. In view of the relatively high filling height of the embankment, the ‘birth and death unit’ method was used to simulate the layered filling process of high fill embankment, and the simulation results were compared with the measured results of settlement. With the increase of pile length, pile diameter and cushion thickness of high fill CFG pile composite foundation by 100%, 33.3% and 66.6% respectively, and the decrease of pile spacing by 40%, the settlement of composite foundation decreases by 63.2%, 46.9%, 7.9% and 61.3% respectively. In the numerical simulation, the

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078499)

作者简介: 彭仪普(1970—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构稳定性与精密测量等方面研究。

'birth and death element' method is used to simulate the load of high fill embankment, which is more consistent with the measured results.

Key words: CFG pile; high fill embankment; numerical simulation; foundation settlement; foundation treatment.

高速铁路作为新一代的交通运输工具,相比于传统铁路而言具有明显的优势,但同时也对线路质量提出了更高的要求^[1-2]。高速铁路路基作为列车高速运行时的基础,对工后沉降有严格的控制^[3-4]。随着我国高速铁路的大规模建设和施工,路基很大程度上会不可避免地会经过一些不良地质区段,这些地基的原始状态较为软弱,需要对天然地基进行人工处理。水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)复合地基是近年来新开发的新一代综合性地基处理技术,它是在碎石桩的基础上掺入适量的石屑、粉煤灰以及少量的水泥加水拌合而成。CFG桩能较充分发挥桩体本身材料的性能,同时充分利用天然地基承载能力,因此采用CFG桩进行高填方地基加固处理,能有效地避免路基的工后沉降问题^[5-7]。

国内外学者和专家对CFG桩复合地基做了大量研究。刘维正等^[8]采用CFG桩联合碎石桩(GC桩)法对红黏土地基加固处理,通过重型动力触探、静力触探、标准贯入、静载等现场试验对地基处理的效果进行分析。刘宏扬等^[9]针对路堤荷载作用下深厚软黏土地基,开展了3组CFG桩复合地基离心模型试验,分析了复合地基的承载与变形特性及失稳滑动形态。武崇福等^[10]为了进一步完善组合渗流排水桩-不排水桩复合地基固结理论,就分级加载下组合型复合地基的固结理论计算展开了研究。黄强兵等^[11]基于动力有限元数值模拟和正交试验设计,研究了地下水位差异和不同地基条件下跨地裂缝带高速铁路基的动力响应及CFG桩对地基加固效果的影响。梁亮等^[12]对天然地基、GC单桩加固复合地基和GC与CFG桩组合加固复合地基在地震荷载作用下的抗液化特

性进行了模拟分析。H. H. Zhang等^[13]研究了在宜昌市白林河路软基础上应用CFG桩处理的各种优势。B. U. Uge^[14]等对临近刚性挡墙的CFG桩复合地基进行了室内试验,研究了处理后地基的应力变化。X. S. Cheng等^[15]建立了CFG桩+水泥土压实桩的有限元模型,并选取人工数值激励法作为模拟原理,研究了列车荷载下复合地基CFG桩+水泥土压实桩的力学特性及差分沉降。J. L. Liu等^[16]研究了CFG桩复合地基处理下高纬度低空岛屿永久冻土的温度行为。X. R. Niu等^[17]提出一种利用CFG桩加固区积分等效模拟的方法,通过数值计算验证了积分等效仿真方法与嵌入式桩元仿真方法的可行性和准确性。

现有学者通过数值模拟等方法对CFG桩复合地基的沉降变形及承载力大小进行了众多研究,并将模拟结果和试验研究结果进行对比,验证了数值模拟方法的正确性。但研究也存在一些问题,例如未能充分考虑高填方路堤荷载的实际加载方式对复合地基沉降量的影响,与工程实际情况存在一定的偏差。基于此,笔者以新建长株潭城际铁路与长石铁路联络线CSLLXZQ-1标高填方CFG桩复合地基工程为背景,采用ABAQUS软件建立高填方CFG桩复合地基三维模型,针对该工程路堤填筑高度相对较高的情况,采用“生死单元”方法模拟高填方路堤的分层填筑过程,并将模拟计算结果与沉降实测结果进行对比。研究发现高填方CFG桩复合地基的沉降主要集中在路基中线位置附近,并朝着两侧路肩方向逐渐减小,采用分级加载的方式模拟高填方路堤荷载更为准确。

1 工程概况及现场沉降观测

1.1 长石联络线工程概况

新建长株潭城际铁路与长石铁路联络线线路全长 9.69 km,设计时速为 200 km/h,其中 DK22 + 300 ~ DK28 + 200 为双线,DK28 + 200 ~ DK31 + 989.73、YDK28 + 200.00 ~ YDK32 + 099.6 为两条单线。项目建成后能将长石铁路城际客车快捷接入长株潭城际铁路网中心站长沙站,使得城际网点线功能更加协调,并能实现与其他城际线路的无缝衔接。长石联络线 CSLXZQ-1 标线路起迄里程 DK22 + 300 ~ DK23 + 563,线路全长 1.263 km。

笔者所依托的 CFG 桩复合地基工程位于长石联络线 CSLXZQ-1 标试验段,起迄里程 DK23 + 200 ~ DK23 + 350,路堤平均高度达 16 m,地基周边农田、池塘密布,试验段 CFG 桩 CFG 桩桩径 0.5 m,呈正方形布置,桩间距为 0.8 m,有效桩长 15 m。CFG 桩现场施工图如图 1 所示。



图 1 CFG 桩复合地基现场

Fig. 1 Site map of CFG pile composite foundation

1.2 沉降观测点位布置

本次 CFG 桩复合地基 DK23 + 200 ~ DK23 + 350 工程段沉降观测共选取 4 个断面设置路基沉降观测桩,断面标号分别为 DK23 + 200、DK23 + 250、DK23 + 300、DK23 + 350,每个断面设置 3 个沉降观测桩,沉降观测桩命名规则为断面里程数 + G1 (G2、G3),其中 G1 代表该断面左侧观测点,G2 代表该断面右侧观测点,G3 代表该断面中间观测点;同时设置沉降板观测断面四处,

断面标号分别为 DK23 + 210、DK23 + 230、DK23 + 332、DK23 + 350,沉降板命名规则为断面里程数 + L1,路基沉降观测标及路基沉降板布置如图 2 所示。

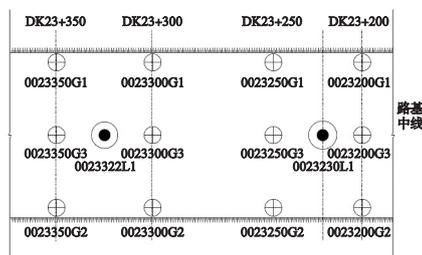


图 2 沉降变形监测点位布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of monitoring points for settlement and deformation

1.3 高填方复合地基沉降观测数据分析

为了探究高填方复合地基沉降量随时间的变化规律,选取 3 个具有代表性的断面数据进行分析,断面里程标号分别为 DK23 + 210、DK23 + 230、DK23 + 332。复合地基沉降量随时间变化曲线如图 3 所示。

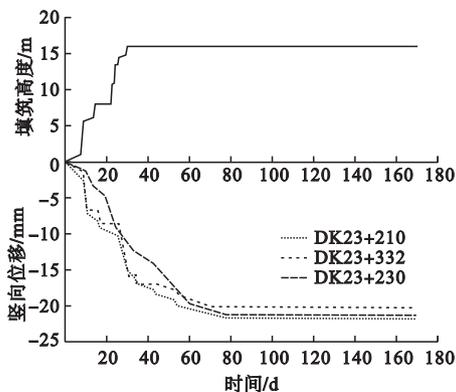


图 3 各典型监测断面沉降量时程图

Fig. 3 Time history diagram of settlement of each typical monitoring section

由图 3 可以看出,3 个典型监测断面的沉降量随时间发展曲线具有一定的“台阶”形状,即当填筑高度增加时,复合地基的沉降量也随之增大,随着现阶段路堤填筑的完成,复合地基沉降量增速也随之减缓。此外还可以看出,3 个典型监测断面的沉降速率表现出相似的规律:初始填土阶段,复合地基沉降速率随时间增长而快速变大,伴随着路堤填

筑高度的不断增大,复合地基沉降速率随着时间增长而缓慢下降。说明在路堤填筑的早期,复合地基土体的固结速率较快,随着上部荷载的增大,复合地基土体逐渐压密,从而沉降速率逐渐变缓,并最终保持稳定。

2 数值模拟方案

2.1 数值模型的建立

2.1.1 基本假定

在模型的建立与模拟过程中,鉴于现场实际工程的复杂性,模型各部位不可能完全与实际工程保持一致,为了了解 CFG 桩复合地基沉降变形的主要规律,减少计算难度,对模型作出以下假定:

- ①路堤填土与地基土各土层为理想弹性体,采用摩尔-库伦模型^[18-19]进行模拟;
- ②将 CFG 桩桩体视为理想弹性体,采用线弹性模型进行模拟;
- ③模拟初始阶段,各土层呈水平均匀分布,CFG 桩呈垂直分布;
- ④不考虑地下水位变化的影响。

2.1.2 几何尺寸选取

笔者建立的 CFG 桩复合地基三维模型主要包括 CFG 桩桩体、各地基土层、褥垫层及路堤填土等几部分,为了确保计算结果的准确性,模型各部位几何参数与实际工程保持 1:1 比例。根据施工设计图纸和地质勘测资料,确定典型断面几何尺寸如图 4 所示,并依此建立典型断面 CFG 桩复合地基各组成部位的三维数值模型。

CFG 桩桩长为 15 m,桩径为 0.5 m,桩间距为 0.8 m;褥垫层厚度取为 40 cm,三维模型计算宽度 B 取两倍的路基底部宽度参与计算,即 $B = 2 \times 30.7 = 61.4$ m,计算深度 L 取三倍的 CFG 桩有效桩长参与计算,即 $L = 3 \times 15.0 = 45$ m,计算长度取 25 m,即三维模型整体大小为 61.4 m \times 45 m \times 25 m。模型如图 5、图 6 所示。

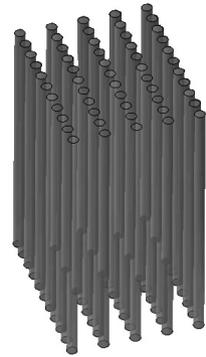


图 5 群桩模型

Fig. 5 Pile group model

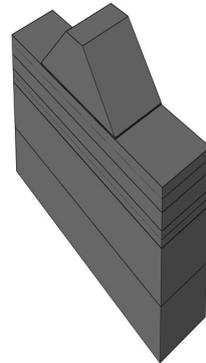


图 6 整体模型

Fig. 6 Overall model

2.1.3 主要计算参数

根据设计资料及施工地质勘查报告,在模型建立过程中,将路堤填土、垫层土及原地基土体均匀的分为 8 层,由上至下分别为路基土、垫层土、杂填地表土、淤泥土、粉质黏土、粗砂、砾砂、含碎石粉质黏土,厚度分别为 16 m、0.4 m、2.8 m、3.3 m、4.6 m、2.1 m、2.0 m、15.6 m。各土层物理力学参数见表 1。模型中所选取的 CFG 桩桩体的物理力学参数见表 2。

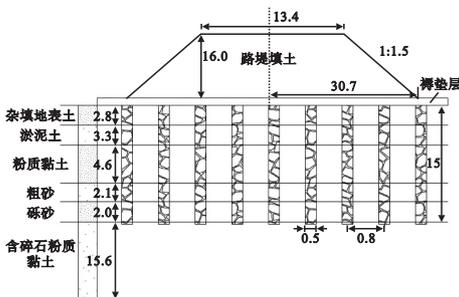


图 4 典型断面几何尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of typical section geometry

表1 模型中土体参数

Table 1 Soil parameters in the model

土层名称	厚度/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa
路基土	16	2 100	80	0.25	15	25
垫层土	0.4	1 900	46	0.3	41	—
杂填地表土	2.8	1 530	15	0.33	15	20
淤泥土	3.3	1 830	6	0.45	10	13
粉质黏土	4.6	1 650	35	0.4	18	30
粗砂	2.1	1 910	50	0.34	33	—
砾砂	2.0	1 750	55	0.3	36	—
含碎石粉质黏土	15.6	1 860	40	0.4	20	25

表2 CFG 桩参数

Table 2 CFG pile parameters

深度/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa
15	2 400	22 000	0.16	—	—

2.1.4 荷载情况、边界条件与网格划分

由于本工程路堤填土高度较高且轨道及列车荷载在复合地基中引起的附加应力较小,因此建模分析时暂不考虑轨道及列车荷载对路基和复合地基沉降的影响,对填筑的路堤土体和原复合地基土体只施加重力荷载。

对模型底部设置为固定约束($U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$),垂直于 X 方向的侧面土体设置为 X 向约束($U_1 = 0$),垂直于 Z 方向的侧面土体设置为 Z 向约束($U_3 = 0$),模型顶面设置为自由面,无约束。

在 ABAQUS 相互作用模块中,将模型中的 CFG 桩桩体与桩间土体的接触类型设置为摩擦接触(“接触”-“力学”-“切向行为”),桩土间摩擦系数采用桩土界面摩擦角 δ 进行计算^[20], δ 一般取土体内摩擦角 φ 的 $1/3 \sim 2/3$,摩擦系数为 $\tan\delta$,通过计算摩擦系数为 0.266 7,取 0.3;此外,将 CFG 桩桩端和土体、路堤填土与垫层土以及垫层土与地基土设置绑定约束类型^[21-22]。

模型单元类型采用八结点线性六面体网格(C3D8R,结构化网格生成,减缩积分,沙漏控制)。整个模型中网格总数为 188 941

个,其中 CFG 桩桩体网格个数为 157 440 个,路堤填土与地基土体网格个数为 31 501 个。

2.1.5 高填方荷载施加方式

由于本工程路堤填筑高度较高,对 CFG 桩复合地基的沉降影响也较大,因此数值模拟过程中,为了尽可能模拟出高填方荷载对 CFG 桩复合地基的影响规律,在施加路堤填土荷载时,采用分级加载的方式,主要过程如下:首先认为每一层路基土填筑速度为均匀进行,并假设每一层土体填筑压实完成后都有一个半月以上的静置期,以确保填土能充分达到固结,最后将高度为 16 m 的高路堤填土分为 8 层,每层 2 m,从下至上依次加载到模型中去。

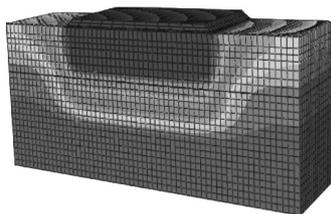
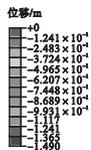
上述过程可以通过 ABAQUS 中的“生死单元”功能实现,即先在“分析步”模块设置 step. 1 ~ step. 8 共 8 个分析步,随后在“相互作用”模块将第二层及以上土层设置为“杀死”状态并赋予给 step. 1 分析步,紧接着分别将第二层土至第八层土设置为“激活”状态,并依次赋予给 step. 2 ~ step. 8 分析步,最后设置载荷、提交作业分析。

2.1.6 数值模拟计算结果

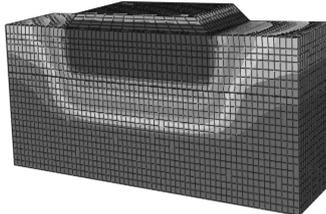
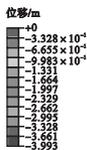
路堤填筑高为 2 m、4 m、6 m、8 m、

10 m、12 m、14 m、16 m 时,CFG 桩复合地基

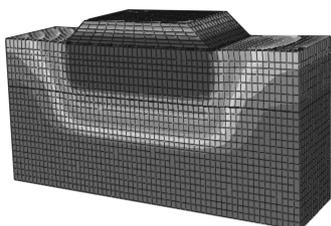
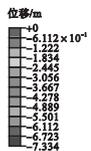
的沉降云图如图 7 所示。



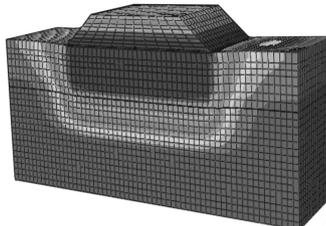
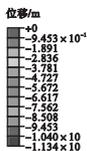
(a)路基高2 m



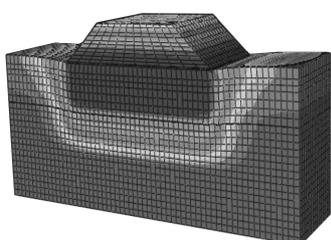
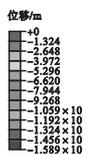
(b)路基高4 m



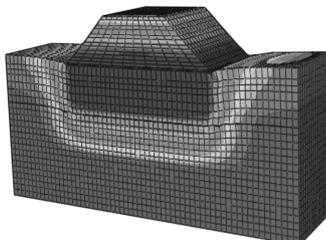
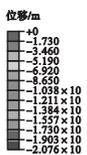
(c)路基高6 m



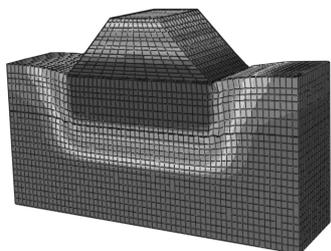
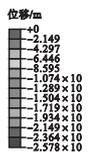
(d)路基高8 m



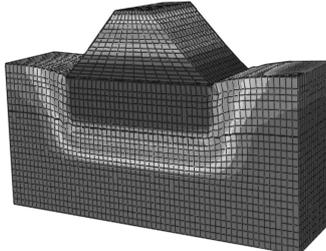
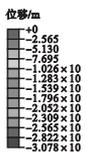
(e)路基高10 m



(f)路基高12 m



(g)路基高14 m



(h)路基高16 m

图 7 不同路堤填筑高度下的复合地基沉降云图

Fig. 7 Contour plots of composite foundation settlement under different embankment filling heights

从图 7 可以看出,在路堤土体强大的附加应力作用下,CFG 桩桩体和桩间土体发生了压缩变形和侧向变形,侧向变形的土体不断挤压周围土体,导致路基脚趾外侧发生了隆起现象,这也预示着若在路基两侧存在既有建筑物,为了确保建筑物的稳定性,在路堤填筑过程中需要重点关注地基隆起对既有建筑物所造成的不利影响。

由各路堤沉降云图可知,随着后期路堤填筑高度的不断加大,土体在自重的作用下逐步实现了压密,路基的沉降值从下至上依次减小,路基土体的后期沉降及变形逐步趋于稳定。这一结果说明后期路基土体本身的沉降较小,高填方 CFG 桩复合地基工后沉降主要是由复合地基沉降引起的。

从云图中加固区和下卧区的网格变形情

况可以看出,复合地基下卧区土体网格变形压缩较大,而加固区土体网格整体压缩变形不明显,说明复合地基在路堤填土荷载作用下的沉降值主要发生于下卧区,同时也反映出加固区中 CFG 桩桩身能承担大部分荷载,并可以将荷载通过桩身传递至下卧层,从而改变加固区土体受力机制,减小复合地基的整体沉降。这也正是 CFG 桩复合地基加固机理的一种体现。

地基沉降分布曲线如图 8 所示。从图中可以看出,在路堤填筑过程中,CFG 桩复合地基的沉降集中出现在离路基中线较近的区域,并朝着两侧路肩方向逐渐减小,整个沉降曲线呈“U”型分布。这是由于在路基中线位置附近复合地基土体所受到的附加应力值最大,而附加应力向着靠近路肩的方向逐渐减小。

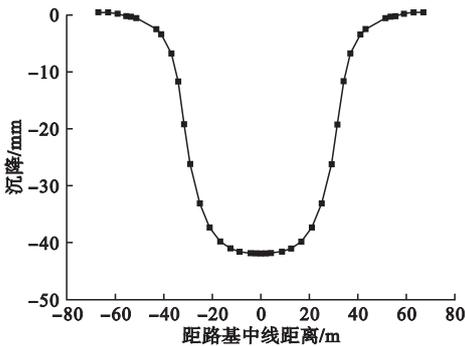


图 8 地基沉降“U”型曲线

Fig. 8 “U” curve of foundation settlement

2.2 CFG 桩复合地基沉降影响因素的有限元分析

2.2.1 垫层厚度对复合地基沉降值的影响

不同厚度垫层下复合地基沉降曲线如图 9 所示。从图中可以得出,垫层厚度为 300 mm、400 mm、500 mm 时,复合地基的沉降量分别为 31.79 mm、30.78 mm、29.27 mm。表明 CFG 桩复合地基沉降随着褥垫层厚度的增大会逐渐减小;但计算结果也表明,这一减少幅度并不是很大,例如垫层厚度为 500 mm 时,复合地基沉降量仅比垫层厚度为 300 mm 时的最大沉降量减少了

2.52 mm。从工程经济学的角度出发,过分增大褥垫层厚度也会增大工程造价,因此在 CFG 桩复合地基的设计及施工过程中,通过增大垫层厚度来减少复合地基沉降量不应作为首选。

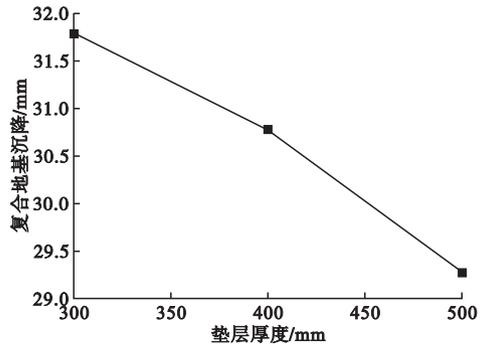


图 9 CFG 桩复合地基沉降值与垫层厚度关系曲线

Fig. 9 The relationship between the settlement value of the CFG pile composite foundation and the thickness of the cushion layer

2.2.2 桩长对复合地基沉降值的影响

不同桩长下复合地基沉降曲线如图 10 所示。从图中可以得出,桩长为 10 m、15 m、20 m 时,复合地基的最大沉降量分别为 36.83 mm、30.78 mm、13.55 mm。表明 CFG 桩复合地基沉降随着桩长的增大会显著减小,其中桩长为 20 m 时的复合地基最大沉降量比桩长为 10 m 时的最大沉降量减少了 23.28 m,减少幅度达 63.2%,说明桩长的变化对复合地基最大沉降量的影响较为显著,

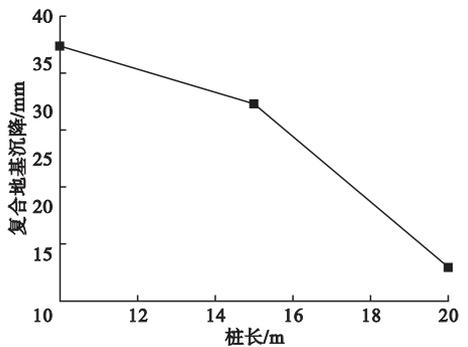


图 10 CFG 桩复合地基沉降值与桩长关系曲线

Fig. 10 Curve of relationship between settlement value and pile length of CFG pile composite foundation

在 CFG 桩复合地基的设计及施工过程中,可以通过加大桩长来达到减少地基沉降量的目的。此外,这一现象可以从 CFG 桩复合地基的作用机理角度进行解释:桩长越大,在上部高填方路堤荷载作用下,“桩体作用”越突出,同时 CFG 桩桩体所分担的荷载也就越多,从而能显著减小复合地基沉降量。

2.2.3 桩径对复合地基沉降值的影响

不同桩径下复合地基沉降曲线如图 11 所示。从图中可以得出,桩径为 0.4 m、0.5 m、0.6 m 时,复合地基的最大沉降量分别为 40.87 mm、30.78 mm、21.70 mm。表明 CFG 桩复合地基沉降随着桩径的增大会显著减小,其中桩径为 0.6 m 时复合地基最大沉降量比桩径为 0.4 m 时的复合地基最大沉降量减少了 19.17 mm,减少幅度达 46.9%,说明增大桩径可以显著减少 CFG 桩复合地基的沉降量。

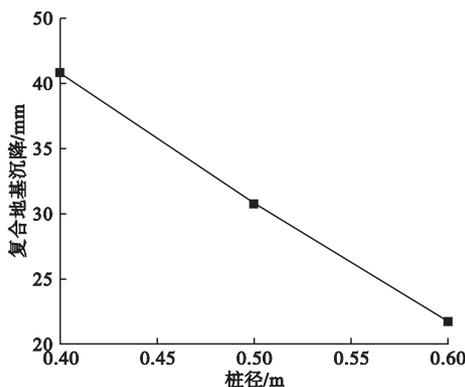


图 11 CFG 桩复合地基沉降值与桩径关系曲线

Fig. 11 Curve of relationship between settlement value and pile diameter of CFG pile composite foundation

2.2.4 桩间距对复合地基沉降值的影响

不同桩间距下复合地基沉降曲线如图 12 所示。桩间距为 0.6 m、0.8 m、1.0 m 时,复合地基的最大沉降量分别为 16.20 mm、30.78 mm、41.88 mm。表明 CFG 桩复合地基沉降随着桩间距的减少会显著减小,其中桩间距为 0.6 m 时的复合地基最大沉降量比桩间距为 1.0 m 时的复合地基最大沉降量减

少了 25.68 mm,减少幅度达 61.3%,说明减少桩间距可以显著减少 CFG 桩复合地基的沉降量。

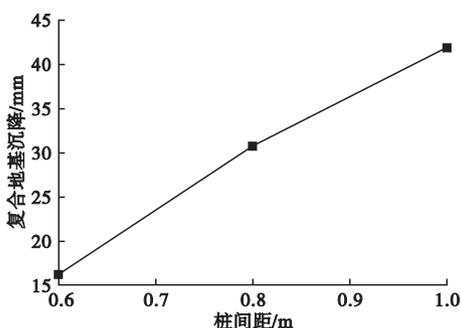


图 12 CFG 桩复合地基沉降值与桩间距关系曲线

Fig. 12 Curve of relationship between settlement value of CFG pile composite foundation and pile spacing

3 数值模拟结果与现场监测结果对比

为验证数值模型中高填方路堤荷载施加方式的准确性,将各层填土荷载下 CFG 桩复合地基沉降值与监测值进行对比分析,结果如图 13 所示。

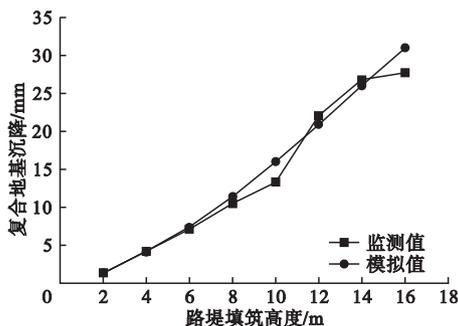


图 13 各层填土荷载下模拟值与监测值对比分析图

Fig. 13 Comparative analysis diagram of simulated values and monitoring values under the loads of each layer of soil filling

从图 13 可以看出,每层填土荷载作用下,CFG 桩复合地基的沉降模拟值与实测值均较为接近,平均相对误差值仅为 5.8%,这一结果表明,笔者采用分级加载的方式模拟高填方路堤荷载对 CFG 桩复合地基沉降的影响是合理的。同时还可以看出,在路堤填

土高度达到最高 16 m 时,高填方 CFG 桩复合地基的模拟最大沉降值为 30.78 mm,而由沉降实测数据可知,该典型断面 CFG 桩复合地基沉降实测值为 27.52 mm,数值模拟计算结果与实测结果较为接近。可认为本模型选取的各个计算参数是合理的,计算得出的结果是可信的,在一定条件下,运用数值模拟方法对 CFG 桩复合地基沉降进行预估是可行的。

造成本次模拟最终沉降值略大于实测值的原因,分析原因如下:①路堤在早期填土过程中对路基沉降板的扰动破坏较为严重,而数值模拟过程忽略了这一影响;②路堤填土和原地基土体的各项物理力学参数会随着施工进度不断发生变化,而在模拟时将土体的物理力学参数在整个模拟过程中视为了常数;③实际工程中,土体不是均匀分布的,且各土层不会保持完全水平、CFG 桩桩体不会完全保持垂直,模型假设中简化了这一现象。

4 结 论

(1)高填方 CFG 桩复合地基的沉降主要集中在路基中线位置附近,并朝着两侧路肩方向逐渐减小,呈现出明显的“U”型分布。

(2)路堤填筑过程中,地基土体的沉降量大于路基土体的沉降量,且在地基内部下卧区沉降量大于加固区的沉降量。

(3)由数值模拟结果可知,当高填方 CFG 桩复合地基桩长、桩径、垫层厚度分别增大 100%、33.3%、66.6%,桩间距减少 40%时,复合地基沉降量分别减少 63.2%、46.9%、7.9%、61.3%,可据此对复合地基的各设计参数进行优化。

(4)各级荷载作用下的沉降模拟值和实测值的平均相对误差仅为 5.8%,验证了本模型中采用分级加载的方式模拟高填方路堤荷载的准确性。

参考文献

[1] 叶阳升,蔡德钧,张千里,等.高速铁路路基结

构设计方法现状与发展趋势[J].中国铁道科学,2021,42(3):1-12.

(YE Yangsheng, CAI Degou, ZHANG Qianli, et al. Current status and development trend of structural design methods for high-speed railroad foundations [J]. China railway science, 2021, 42(3): 1-12.)

[2] 岳祖润,介少龙.高速铁路运营期注浆线路平顺性监测技术研究[J].铁道工程学报,2022,39(1):13-17.

(YUE Zurun, JIE Shaolong. Research on monitoring technology for smoothness of grouting line during high-speed railway subgrade operation period [J]. Journal of railway engineering, 2022, 39(1): 13-17.)

[3] 王敏,徐林荣,黄宇华,等.高铁软基工后沉降特性与加固效果[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):29-35.

(WANG Min, XU Linrong, HUANG Yuhua, et al. Post construction settlement characteristics and reinforcement effect of high-speed railway soft foundation [J]. Journal of civil and environmental engineering (Chinese and English), 2019, 41(1): 29-35.)

[4] 陈玄,高伟,段光耀,等.京津城际铁路(北京段)沉降监测及影响因素分析[J].遥感信息,2020,35(3):78-84.

(CHEN Xuan, GAO Wei, DUAN Guangyao, et al. Analysis on settlement monitoring and influencing factors of Beijing Tianjin intercity railway (Beijing section) [J]. Remote sensing information, 2020, 35(3): 78-84.)

[5] 芮勇勤,安月,王振华,等.下穿桥梁紧邻高铁地铁联络线基坑群施工力学特性数值模拟[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(5):851-860.

(RUI Yongqin, AN Yue, WANG Zhenhua, et al. Numerical simulation of the construction mechanics characteristics of the foundation pit group on metro connection line with under crossing bridge adjacent to high-speed railway [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(5): 851-860.)

[6] 商拥辉,徐林荣,陈钊锋.高铁 CFG 桩—筏复合地基固结解析及特性[J].中国铁道科学,2021,42(1):1-8.

(SHANG Yonghui, XU Linrong, CHEN Zhaofeng. Analytical solution and characteristics of consolidation of CFG pile raft composite foundation for high-speed railway [J]. China railway science, 2021, 42(1): 1-8.)

[7] 张峰,刘莹,许兆义,等.武广高铁 CFG 桩复合地基工后沉降影响因素[J].西南交通大学学报,2015,50(5):783-788.

(ZHANG Feng, LIU Ying, XU Zhaoyi, et al. Factors affecting post construction settlement of CFG pile composite foundation of Wuhan Guangzhou high speed railway [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2015, 50(5): 783-788.)

- [8] 刘维正,冯瑜,吴民晖,等. 机场高填方红黏土地基 GC-CFG 组合桩处理试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(1):156-168. (LIU Weizheng, FENG Yu, WU Minhui, et al. Experimental study on GC-CFG composite pile treatment of airport high fill red clay foundation [J]. Journal of railway science and engineering,2023,20(1):156-168.)
- [9] 刘宏扬,罗强,薛元,等. 路堤荷载下 CFG 桩复合地基失稳破坏特性离心模型试验[J]. 岩土工程学报,2022,44(8):1502-1511. (LIU Hongyang, LUO Qiang, XUE Yuan, et al. Centrifugal model test on instability and failure characteristics of CFG pile composite foundation under embankment load [J]. Journal of geotechnical engineering, 2022, 44(8):1502-1511.)
- [10] 武崇福,李文雪,李文涛,等. 分级加载下组合渗流碎石桩-CFG 桩复合地基固结解答[J]. 中国公路学报,2022,35(8):140-150. (WU Chongfu, LI Wenxue, LI Wentao, et al. Consolidation solution of composite foundation of composite seepage gravel pile CFG pile under graded loading [J]. Journal of China highway engineering, 2022, 35(8):140-150.)
- [11] 黄强兵,王涛,刘悦,等. 跨地裂缝带高速铁路基动力响应及 CFG 桩地基加固优化研究[J]. 铁道学报,2020,42(1):103-111. (HUANG Qiangbing, WANG Tao, LIU Yue, et al. Study on dynamic response of high-speed railway subgrade crossing ground fissure zone and optimization of CFG pile foundation reinforcement [J]. Journal of railways, 2020, 42(1):103-111.)
- [12] 梁亮,王士杰,刘青. GC 与 CFG 多桩型复合地基抗液化数值分析[J]. 建筑科学,2017,33(1):11-16. (LIANG Liang, WANG Shijie, LIU Qing. Numerical analysis of liquefaction resistance of GC and CFG multi pile composite foundation [J]. Building science,2017,33(1):11-16.)
- [13] ZHANG Huahua, LIU Liming, FENG Wei, et al. Design selection and dynamic response analysis of CFG pile composite foundation in soft soil areas [J]. Frontiers in materials, 2022,9:980375.
- [14] UGE B U, GUO Yuancheng, LIU Yunlong. Numerical study on stress paths in grounds reinforced with long and short CFG piles during adjacent rigid retaining wall movement [J]. Studia geotechnica et mechanica,2022,44(1):38-52.
- [15] CHENG Xuansheng, LIU Gongning, GONG Lijun, et al. Mechanical characteristics plus differential settlement of CFG pile and cement-soil compacted pile about composite foundation under train load [J]. Geomechanics and engineering,2020,20(2):155-164.
- [16] LIU Jinliang, JIA Yanmin. Temperature analysis of CFG pile composite foundation in high latitudes and low altitude island permafrost [J]. International journal of structural integrity,2019,10(1):85-101.
- [17] NIU X R, YAO Y P, SUN Y F, et al. 3D Numerical analysis of synergetic interaction between high-rise building basement and CFG piles foundation [J]. Applied sciences,2018,8(11):38-52.
- [18] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002(3):343-346. (ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. The safety factor of slope stability is calculated by finite element strength reduction method [J]. Journal of geotechnical engineering,2002(3):343-346.)
- [19] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement [J]. Computers and structures, 2005(83):588-598.
- [20] 郭丹,王斌,唐凯,等. 桩土摩擦系数取值方法对桥桩单侧开挖模拟结果的影响规律[J]. 公路,2021,66(12):98-106. (GUO Dan, WANG Bin, TANG Kai, et al. The law of the influence of the value method of pile-soil friction coefficient on the simulation results of unilateral excavation of bridge piles [J]. Highway, 2021, 66(12):98-106.)
- [21] 宋金华,要晓迪,杨涛. 基于 ABAQUS 的 PHC 桩网复合地基沉降变形特性研究[J]. 公路,2019,64(12):34-41. (SONG Jinhua, YAO Xiaodi, YANG Tao. Study on settlement and deformation characteristics of PHC pile-net composite foundation based on ABAQUS [J]. Highway, 2019, 64(12):34-41.)
- [22] 刘伟,解磊,王宇阳. 复合地基承载力深度修正研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(4):682-686. (LIU Wei, XIE Lei, WANG Yuyang. The study of the depth modification of composite foundation bearing capacity [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(4):682-686.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)