

褥垫层参数对 CFG 桩复合地基承载特性的影响研究

付 豪

(重庆市设计院, 重庆市 400015)

摘 要:为研究褥垫层物理参数对 CFG 桩复合地基承载特性的影响,采用 Midas/GTS 建立了某工程 CFG 桩复合地基有限元模型,分析了不同工况下的地基沉降量和桩土应力比。研究结果表明,随着上部荷载的增大,地基沉降量和桩身应力比也呈增大的趋势,褥垫层能降低地基沉降量。垫层厚度越大,地基沉降量越小,桩土应力比越大;垫层模量越大,地基沉降量越小,桩土应力比越大。选择合理的褥垫层参数有利于调节桩土荷载分担比例,充分发挥地基承载性能。考虑经济效益和安全性能范围内,该工程褥垫层厚度宜取值为 400 mm,模量宜取值 70 MPa,实际工程的合理设计具有指导作用。

关键词:CFG 桩复合地基;褥垫层;沉降;桩土应力比

中图分类号: TU451.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)12-0159-04

0 引 言

随着我国基础建设行业的不断发展,需要利用有限的土地资源来修建交通、水利工程等基础设施。由于各地区工程地质、水文地质条件等的不同,当地基条件不符合建筑物的承载需求时,需要对该地进行地基处理。CFG 桩复合地基具有较好的承载性能,处理成本较低且节能环保,因此在粉土地区得到广泛使用,许多学者也对其进行了深入的研究。刘统广^[1]通过室内载荷试验研究了褥垫层厚度对水泥土桩复合地基承载性能的影响,表明合理控制垫层厚度能够优化桩土应力比。周志军等^[2]基于极限分析下限法,推导出褥垫层的极限承载力下限解以及桩土应力比公式,并揭示了褥垫层存在压密和塑性流动变形特性。李守德、郭海庆等^[3-4]采用 FLAC3D 建立了 PHC 短桩复合地基模型,结果表明褥垫层厚度及模量对其承载特性具有一定影响。谷成岳^[5]采用灰色关联分析法研究了长短桩复合地基作用机理,并对影响其承载能力的因素进行敏感性分析,得出路基填筑高度对复合地基受力和沉降变形的影响最大。

褥垫层的存在有以下四个作用:(1)保证了桩、土间的共同作用;(2)使桩顶对基础底面的作用力均匀分布;(3)改善桩、土竖向荷载承担比例;(4)调节

桩、土之间的水平荷载^[6-7]。实际工程中各地区地质条件不同,复合地基受力情况也较为复杂,为更好地研究复合地基承载机理,优化地基设计处理,运用 MIDAS GTS NX 有限元软件对 CFG 桩复合地基褥垫层进行数值模拟,分析了褥垫层厚度以及模量对复合地基承载特性的影响规律。

1 数值模拟

1.1 计算原理

某路基工程地基承载力较差,天然地基无法满足建筑物的承载需求,需要对天然地基进行加固处理。经过各种方案比对,CFG 桩复合地基能够对其进行优化处理。复合地基沉降变形的有限元法是以连续介质力学为基础,将连续体有规律的分割为有限个单元,通过分析单个或多个节点的力和位移变化,对整个结构的应力应变以及位移等进行分析。确定场地函数的节点值,将节点位移作为未知量,假设一个简单的函数来近似模拟其位移分布规律,基于弹塑性理论原理建立节点力与节点位移之间的联系,获得节点位移作为未知量的代数方程,解得节点的位移分量,最后利用插值函数确定单元结合体上的场函数。解的精确程度会随着单元尺寸的减小、单元数量的增加、自由度的增多以及插值函数精度的提高而增大,若单元收敛则近似解将无限趋近于精确解。单元刚度矩阵由虚功原理得到: $\{F\}^e = \{k\}^e \{\delta\}^e$

其中 $\{F\}^e$ 为单元节点力矩阵; $\{k\}^e$ 为单元刚度矩阵, $\{k\}^e = \iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz$ 。

收稿日期: 2021-07-23

作者简介:付豪(1988—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

1.2 几何模型及工况

为了能够直观全面的了解整个路堤对复合地基的作用形式,将路堤施工简化为二维平面问题进行处理。某工程路面宽度为 12 m,路堤坡度为 1 : 1.5,整个路堤分 6 层进行填筑,每层填筑厚度为 1 m。建模时为消除边界效应对路基的影响,将地基延伸 10 m,地基宽度为 40 m,高度为 17 m。CFG 桩长为 10 m,桩径为 0.5 m,桩间距为 1.5 m。土层以及 CFG 桩的物理参数见表 1,其参数皆来自于地勘报告和经验值。各土层采用摩尔-库伦模型,CFG 桩为弹性模型用 1D 梁单元进行模拟。生成网格采用自动-区域功能,生成混合网格,褥垫层通过尺寸控制细化区域单元网格的尺寸,建立边界约束和重力荷载。CFG 桩复合地基有限元模型与网格划分见图 1。

表 1 土层、桩的物理参数设置

材料	重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹模 /MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	粘聚力 c/kPa
填土层 1	18.6	18.6	0.24	18.5	36.7
填土层 2	19.3	22.4	0.26	20.4	34.6
填土层 3	20.5	25.8	0.30	25.7	28.7
填土层 4	20.5	38.7	0.28	26.1	29.3
填土层 5	20.8	46.9	0.29	24.3	31.4
填土层 6	21.9	54.8	0.26	30.8	35.9
地基土 1	19.6	37.8	0.25	24.7	34.9
地基土 2	20.4	40.3	0.31	36.9	21.7
地基土 3	20.5	37.5	0.32	35.6	18.6
基岩	22.6	75.8	0.26	40.8	-
CFG 桩	23.9	15 000	0.5	-	-

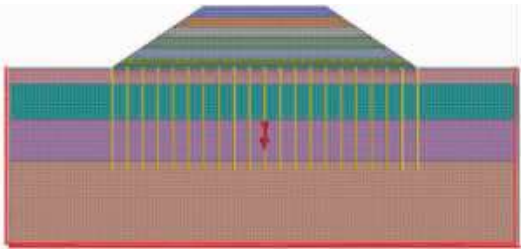


图 1 路基模型

采用控制变量法分析褥垫层厚度和模量对路基沉降量和桩土应力比的影响,数值模拟工况见表 2。施工步骤分为以下几步:(1)开挖初始地应力平衡;(2)激活 CFG 桩和碎石褥垫层;(3)路堤填土分 6 层激活施工。其中某工况最终的沉降云图见图 2,桩间应力见图 3,桩间土应力见图 4。

表 2 垫层工况设置

工况	厚度 /m	重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹模 /MPa	泊松比	内摩擦角 $/(\text{^\circ})$
A1	0/100/200/300/ 400/500/600	20	70	0.32	35
A2	300	20	30/50/70/90	0.32	35

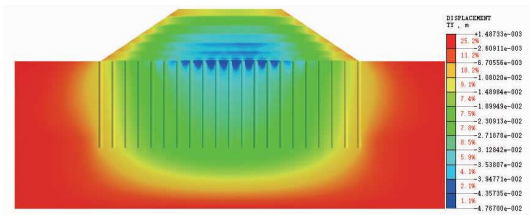


图 2 复合地基的最终沉降云图

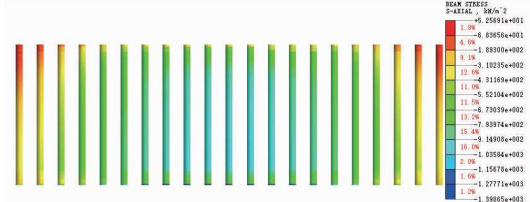


图 3 桩身应力云图

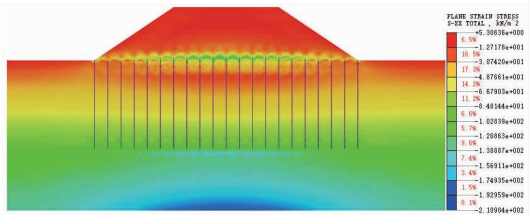


图 4 桩间土应力云图

2 结果分析

2.1 褥垫层厚度的影响

用控制变量法模拟褥垫层厚度对路基填筑沉降量的影响,其他条件保持不变,设置褥垫层厚度的范围为 0~600 mm。图 5 褥垫层厚度对路基沉降量的影响,可以看出不同工况下路堤的沉降量范围为 0~60 mm。设置褥垫层条件下的路基的沉降量低于无褥垫层条件下的路堤沉降,说明铺设褥垫层可以有效减小路基沉降。在相同褥垫层厚度条件下,随着上部荷载的增加,路基沉降量不断增大;在相同上部荷载条件下,随着铺设褥垫层厚度的增大,其沉降量逐渐减小。当褥垫层厚度由 100 mm 增大至 600 mm,路基沉降量变化率依次分别为 9%、12%、17%、5%、7%。当褥垫层厚度小于 400 mm 时沉降量变化率随着褥垫层厚度的增大而逐渐增大;褥垫层厚度达到 400 mm 时,沉降量的变化率达到最大值;当沉降量大于 400 mm 后,沉降量变化率随褥垫层厚度的增加而减小。由此可以得出垫层厚度超过 400 mm 时,沉降量变化率不够明显。褥垫层对减小地基沉降具有一定作用,但并不是厚度越大其调节作用越明显,需要在考虑到经济效益和安全适宜的条件下,科学合理的设计褥垫层厚度。

图 6 为不同褥垫层厚度对路基桩土应力比的影响,桩土应力比为桩顶应力与桩间土之间的应力比,不同工况下的桩土应力比范围为 0~6。从图中可以看

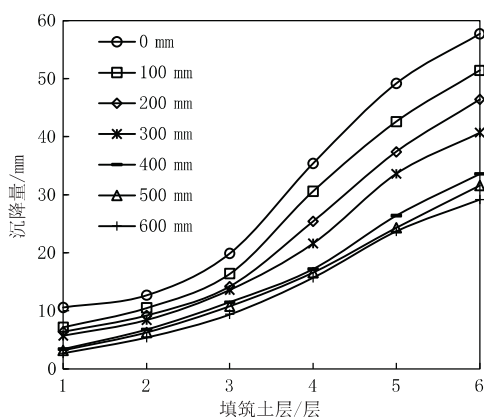


图5 不同垫层厚度对地基沉降的影响

出在同一褥垫层厚度情况下,随着上部荷载的增加,桩土应力比不断增大。在相同上部荷载条件下,随着褥垫层厚度的增大,桩土应力比逐渐减小。路基分层填筑施工完成后,当褥垫层厚度小于 400 mm 时,随着褥垫层厚度的增大桩身应力比相差较大;当褥垫层厚度大于 400 mm 后,随着褥垫层厚度的增加桩身应力比差别不明显。由此可以得出垫层厚度超过 400 mm 后,褥垫层的增加对桩土应力比的减小作用在弱化。当褥垫层厚度较小时,桩土应力比较大,桩端刺入垫层会产生应力集中现象,使得桩土间承载力不能有效发挥。当褥垫层厚度逐渐增大,桩端有适当的上刺空间,从而调节桩土间应力比,使得桩土间承载力得以有效发挥。基于上述数值模拟结果,可以得出该工程较合理的褥垫层厚度为 400 mm,在安全经济的范围内既能减小沉降量也能适当调节桩土应力比。

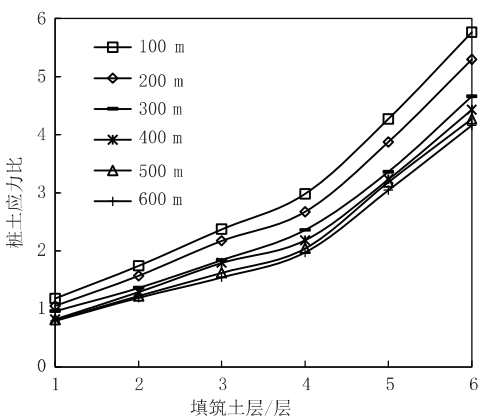


图6 不同垫层厚度对桩土应力比的影响

2.2 褥垫层模量的影响

图 7 为褥垫层模量对地基沉降的影响,可以看出在相同垫层模量条件下,随着上部荷载的增大,地基沉降量不断增大。在相同上部荷载作用下,随着褥垫层弹性模量的增大,地基沉降量呈逐渐减小的趋势,说明增大褥垫层弹性模量可以减小地基沉降量。

增加垫层模量会加剧桩身应力集中的现象,则更多的荷载由桩体承担,从而调节了桩土间荷载分担,这时土体承担荷载较小,因此沉降量随之逐渐减小。路堤分层填筑施工完成后,当褥垫层模量由 30 MPa 增大至 90 MPa,地基沉降量变化率分别为 7%、11%、5%。当褥垫层模量小于 70 MPa 时地基沉降量变化率随弹模的增大而增大;褥垫层模量达到 70 MPa 时,沉降量变化率达到最大值;当垫层模量大于 70 MPa 后,地基沉降量变化率最小。由此可以得出垫层模量超过 70 MPa 时,地基沉降量变化不再明显,增大弹性模量对地基沉降的减小作用在弱化。

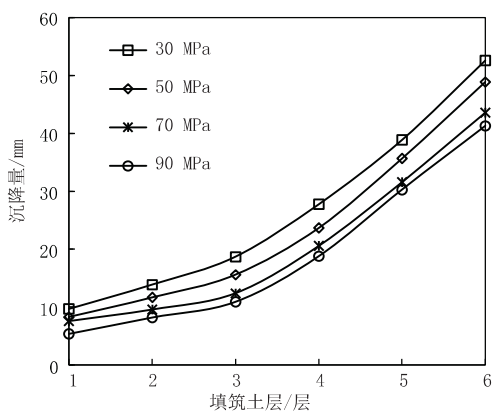


图7 不同垫层模量对地基沉降的影响

褥垫层模量对桩土应力比也会产生一定影响,图 8 是桩土应力比随填筑土层和褥垫层模量变化的曲线。从图中可以看出,在相同垫层模量下,桩土应力比随着上部荷载的增大而增大;在相同上部荷载作用下,垫层模量越大桩土应力比越大。当褥垫层模量由 30 MPa 增大至 90 MPa,四种工况下填筑完成后其桩土应力比变化率分别为 14%、8%、3%。可以得出随着褥垫层模量的增大,桩土应力比变化率在缓慢减小,当模量达到 70 mm 后,桩土应力比变化不再明显,说明增大弹性模量对增大桩土应力比的作用在弱化。这是由于垫层模量越大,桩体向上部刺入量减小,导致褥垫层对桩间土体的挤密作用弱化,从而桩身承担更多荷载,桩土应力比就越大。如果模量设置较大,会造成桩顶应力集中,容易引发桩在浅层发生鼓胀破坏;模量设置较小会增大地基沉降量,因此实际工程中需要根据地质条件来选择垫层材料。由上述模拟结果可知,该工程褥垫层模量宜控制在 70 MPa 左右较为合理。

3 结 论

采用 Midas/GTS 建立了 CFG 桩复合地基的数值模拟,研究了褥垫层厚度和模量对地基承载特性的

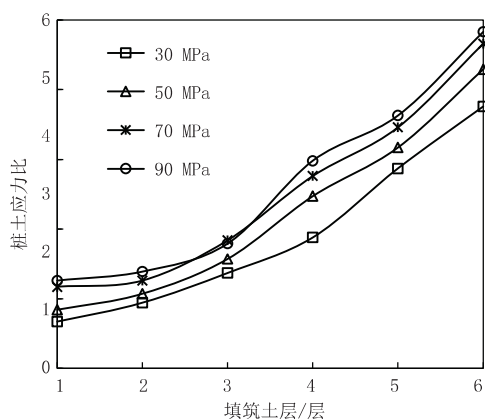


图 8 不同垫层模量对桩土应力比的影响

影响,以指导地基褥垫层设计,主要结论如下:

(1)随着上部荷载的增大,CFG 桩复合地基的沉降量呈增大的趋势,桩土应力比也呈增大的趋势。设置褥垫层能够有效减小地基沉降量。

(2)在相同上部荷载条件下:褥垫层厚度越大沉降量越小,桩土应力比越大;褥垫层弹性模量越大,沉降量越小,沉降量桩身应力比越大。

(3)褥垫层厚度以及模量对复合地基的承载特性会造成较大影响,选择合理的褥垫层参数有利于调节桩土荷载分担比例,充分发挥地基承载性能,通过本次数值模拟工况分析,该工程褥垫层厚度宜取值为 400 mm,模量宜取值 70 MPa。

参考文献:

- [1] 刘统广.水泥土桩复合地基褥垫层厚度试验研究[J].工程技术研究, 2020,5(8):36-37.
- [2] 周志军,王连坤,王敏容,等.复合地基中褥垫层的极限下限分析[J].中国科技论文,2013,8(11):1153-1158.
- [3] 李守德,顾文强,赵波.褥垫层对刚性短桩复合地基承载特性的影响[J].科学技术与工程,2014,14(8):246-250.
- [4] 郭海庆,杨毅,王振宇.褥垫层对 CFG 桩复合地基加固作用的分析研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2013,35(2):56-60.
- [5] 谷成岳.长短桩复合地基作用机理及敏感性分析[J].铁道建筑技术, 2020(5):16-20,69.
- [6] 徐刚,赵丽华.CFG 桩复合地基中褥垫层效应分析[J].中外公路,2014, 34(1):62-64.
- [7] 徐继欣,张鸿,周院芳,等.褥垫层厚度对复合地基 CFG 桩土应力比影响的试验研究[J].公路工程,2012,37(3):59-62,126.

(上接第 149 页)

2015, 10 (5): 167-172.

- [10] 刘小丽,朱进军,邵勇.软土基坑桩锚支护结构变形特征数值模拟分析—以连云港某基坑桩锚支护为例 [J].安全与环境工程, 2015, 22(6): 156-160.
- [11] 濮辉铭,燕柳斌,刘雄心.考虑施工过程的基坑锚杆支护计算机模拟研究[J].广西大学学报(自然科学版), 2005(2): 151-155.
- [12] Zhao, YM, and Yang, M.J. Pull-out behavior of an imperfectly bonded anchorsystem [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3):469-475.
- [13] 李子运,刘博明.预应力锚拉桩支护下的深基坑变形分析 [J].重

庆科技学院学报, 2015, 17(2): 95-99.

- [14] 张向霞,黄爱军.土层锚杆在深基坑支护中的应用研究 [J]. 建筑技术, 2015, 46(6): 546-550.
- [15] 袁蕴伟,李长洪.深基坑中锚杆水平角对支护效果的敏感性分析[J].工业工程与技术, 2014, 18(9): 54-57.
- [16] 杨校辉,朱彦鹏,郭楠,等.地铁车站深基坑桩锚支护结构内力试验研究[J].岩土力学, 2014, 35(S2): 185-197.
- [17] Ma, S. Q, Nemcik, J. and Aziz, Z. An analytical model of fully grouted rock boltssubjected to tensile load [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49(02):519-526.