

# 柔性基础下 CFG 桩复合地基桩土应力比研究

曾文伟<sup>1,2</sup>, 吴国华<sup>3</sup>

(1. 广东省核工业地质局二九三大队, 广东 广州 510800; 2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 3. 江西省交通科学研究所, 江西 南昌 330000)

**摘要:**近年来 CFG 桩复合地基技术在公路工程的软基处理中得到了应用,而在这些工程中路堤是一种柔性基础,与 CFG 桩复合地基技术的刚性基础假设不同。利用 ABAQUS 大型通用性有限元软件研究了桩长、桩土模量比、垫层厚度和模量、路堤土模量、桩端土和桩间土模量比对柔性基础下 CFG 桩复合地基桩土应力比的影响,得出了桩长、桩与桩间土模量对桩土应力比  $n$  有很好调控性,垫层刚度对桩土应力比影响不大,垫层效应主要体现在垫层厚度对桩土应力比的影响的结论。

**关键词:**柔性基础;复合地基;CFG 桩;桩土应力比;垫层

**中图分类号:**U416.1;TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2008)02-0027-04

**Numerical Analysis on Pile-soil Stress Ratio of CFG Pile Composite Foundation with Flexible Base/ZENG Wen-wei<sup>1,2</sup>, WU Guo-hua<sup>3</sup>** (1. No. 293 Geological Brigade Guangdong Nuclear Industry Bureau, Guangzhou Guangdong 510800, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. Jiangxi Communications Research Institute, Nanchang Jiangxi 330000, China)

**Abstract:** Recently CFG pile composite foundation technology is applied in the soft soil foundation of road engineering. However, embankment is regarded as a kind of flexible base in these projects, which is different from the assumption of rigid foundation of CFG pile composite technique. Analysis was made by ABAQUS large general finite element software on the influence of pile length, pile soil modulus ratio, cushion thickness and modulus, embankment soil modulus, modulus ratio of pile-end soil and soil between piles on pile-soil stress ratio of CFG pile composite foundation with flexible base.

**Key words:** flexible base; composite foundation; CFG pile; pile-soil stress ratio; cushion

近年来,随着我国高速公路建设的迅速发展,地基处理技术 CFG 桩复合地基<sup>[1]</sup>在高速公路软基处理中得到了应用并取得了较好的效果<sup>[2]</sup>。由于 CFG 桩复合地基技术采用了刚性基础的假设,而路堤为柔性基础,受力变形后基础面不可能保持平面,因此在设计中直接采用刚性基础下的研究成果势必造成设计的不合理性。为此,我们利用 ABAQUS 有限元软件对柔性基础下 CFG 桩复合地基有限元模型的桩土应力比进行了研究,本文介绍了研究的结果。

## 1 有限元计算基本模型

为了按平面应变问题建立有限元模型,假设 CFG 桩体为平行于路堤中心线方向分布的连续墙,且连续墙的宽度等于 CFG 桩体的直径。

本文柔性基础下 CFG 桩复合地基模型的建立以某公路工程<sup>[5]</sup>为背景,并根据需要做一些简化,

具体描述如下。

### 1.1 基本模型尺寸

路堤顶宽 26 m,底宽 44 m,高 6.0 m,边坡斜率 1: 1.5,垫层厚 0.3 m,桩长 15 m,桩直径 0.4 m,桩间距 3.0 m。通过计算比较,桩端土计算深度取桩长的 2 倍即 30 m,计算宽度从堤脚向两侧各延伸 28 m,考虑到路堤的对称性,以路堤中心线为对称轴,取路堤的一半建立计算的基本模型,模型断面如图 1 所示。

### 1.2 边界条件

对称轴一侧为水平约束,底部和右侧面为固定约束。

### 1.3 材料的本构模型及物理力学参数

CFG 桩采用线弹性模型,路堤土、垫层、桩间土和桩端土均采用理想弹塑性模型,屈服准则为 Drucker-Prager 准则。模型中材料的物理力学参数是结合工程资料和相关规范取得的,见表 1。

收稿日期:2007-12-27

**作者简介:**曾文伟(1964-),男(汉族),广东揭阳人,广东省核工业地质局二九三大队高级工程师,中国地质大学(武汉)工程硕士研究生,应用地球物理专业,从事地基处理及检测、岩土工程勘察、岩土工程治理和工程桩基质量检测工作,广东省广州市花都区花城路 48 号,293zww@163.com。

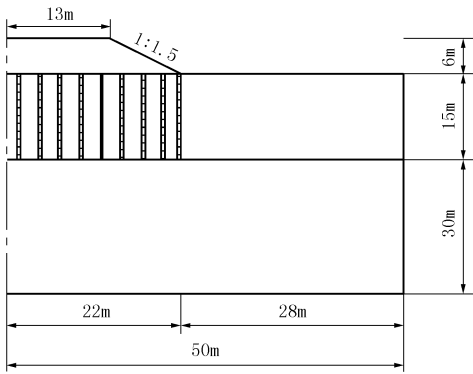


图 1 基本模型断面

表 1 基本模型中材料物理力学参数

	重度 $\gamma$ $/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 $E/kPa$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 $c/kPa$
路堤土	19.6	40	0.25	32	50
垫层		60	0.22	45	0
桩间土		10	0.42	10	17
桩端土		20	0.35	15	21
CFG 桩		$1 \times 10^3$	0.20		

### 1.4 桩土接触面

在桩和土之间设置接触面,采用库伦摩擦模型,该模型可以描述一般的接触面摩擦性质,并用摩擦系数来表征两个表面间的摩擦行为。

### 1.5 荷载的施加

为了模拟施工过程,利用 12 个荷载步由下至上逐步加载,每一个荷载步对应的荷载为 0.5 m 高的填土。荷载水平所对应的荷载大小见表 2。

表 2 荷载水平与荷载大小的对应关系

荷载水平	荷载大小/kPa	荷载水平	荷载大小/kPa
1	9.6	7	60.4
2	18.9	8	67.7
3	27.9	9	74.7
4	36.5	10	81.3
5	44.8	11	87.6
6	52.8	12	93.5

### 1.6 有限元方程组的求解

考虑复合地基中桩体和桩间土的材料非线性特性,不考虑其几何非线性,即认为是小变形情况,有限元结点平衡方程式可写为:

$$[K]\{\delta\} = \{R\}$$

它就是一个以位移  $\{\delta\}$  为未知量的非线性方程组。ABAQUS<sup>[6]</sup> 中采用增量迭代法对每一级荷载增量用迭代法多次计算,使其收敛于真实解。

## 2 有限元计算结果分析

本文通过 ABAQUS 有限元软件建立上述柔性

基础下 CFG 复合地基模型并分别研究了桩长、桩土模量比、垫层厚度和模量、桩端土与桩间土模量比、路堤土模量对桩土应力比  $n$  的影响。

### 2.1 桩长的影响

图 2 是不同桩长下复合地基中桩顶平面桩土应力比随荷载水平的变化规律。从图中可得出,在整个荷载水平变化范围内,不同桩长的桩土应力比  $n$  随荷载水平的增减幅度很小,可以看作几乎保持不变,曲线呈现基本相同的规律,均近似于一直线。在同一荷载水平下,桩土应力比随桩长的增大有较大幅度的增加,桩长由 5 m 增至 25 m 的过程中,各级荷载下的平均桩土应力比  $n$  从 6.3 增加到 22.5,相当于每增加 1 m 桩长,桩土应力比  $n$  增加 0.8。可见,在一定荷载水平下,桩长对桩土应力比的影响较大。另外,桩长对桩土应力比  $n$  影响显著同时说明了 CFG 桩桩体增强效果好,不存在有效桩长问题。

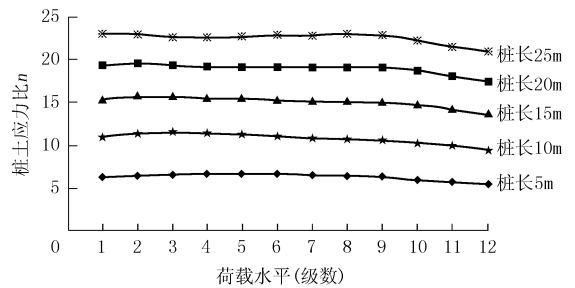


图 2 不同桩长下桩土应力比  $n$  随荷载水平的变化关系

### 2.2 桩土模量比的影响

不同桩与桩间土模量比下桩顶平面桩土应力比与荷载水平的关系见图 3。

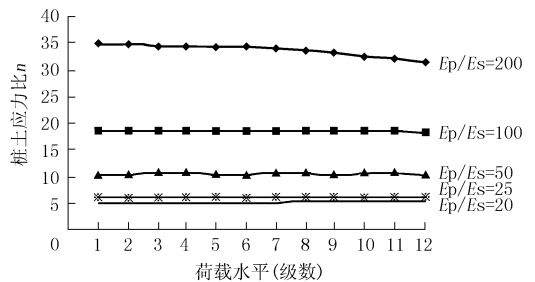


图 3 不同桩土模量比下桩土应力比与荷载水平的关系

从图 3 可以得出,当  $E_p/E_s \leq 100$  (桩与桩间土模量比) 时,各桩土模量比下的桩土应力比  $n$  随荷载水平的变化几乎保持不变。当  $E_p/E_s = 200$  时,桩土应力比  $n$  较大,达到了 35,导致桩顶应力较大,该应力虽没达到桩的极限应力,但使得桩顶的垫层发生塑性破坏,通过挤压使得桩间土应力增大,因而出现了随荷载增大桩土应力比  $n$  相对较大幅度减小的

现象。另外,同一荷载水平下,桩土应力比  $n$  随  $E_p/E_s$  的增大而增大,当  $E_p/E_s < 100$  时,桩土应力比随荷载水平增大的增幅几乎一致;当  $E_p/E_s > 100$  时,桩土应力比  $n$  在小荷载水平增幅较大,而随荷载水平增大增幅有所下降。

### 2.3 垫层的影响

图 4 是不同垫层厚度下桩顶平面桩土应力比  $n$  随荷载水平的变化关系。从图中可以看出,当无垫层时,桩土应力比  $n$  开始有一个减小,在第 3 级荷载时达到最小,之后随荷载增大而增大。当有垫层时,桩土应力比  $n$  随荷载变化曲线呈以荷载水平 8 为顶点的近似抛物线,当荷载水平小于 8 时,桩土应力比  $n$  随荷载增大而增大;当荷载水平大于 8 时,桩土应力比  $n$  随荷载水平的增大而减小。在垫层厚度  $\geq 0.8$  m 时桩土应力比  $n$  随荷载水平变化幅度较大,而当垫层厚度  $< 0.8$  m 时桩土应力比  $n$  随荷载水平变化幅度小。另外,在垫层厚度 1 m 之前桩土应力比  $n$  随垫层厚度的增大程度较大,之后增大垫层厚度桩土应力比  $n$  几乎不变,故认为垫层达到 1 m 后,通过改变垫层厚度来调整桩土应力比效果不明显。

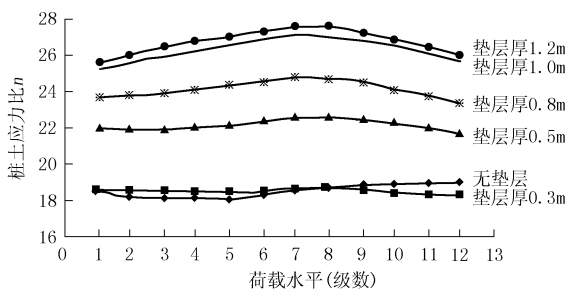


图 4 不同垫层厚度下桩土应力比  $n$  随荷载水平的变化关系

图 5 是不同垫层模量下桩土应力比  $n$  随荷载水平的变化关系。在研究中,取了 60、75、100 MPa 三种模量,它们分别代表了中粗砂、砾石和碎石 3 种工程中常用的垫层。图中可以看出随垫层模量的增大,桩土应力比  $n$  增大,但这 3 种垫层的桩土应力比  $n$  都在 18 ~ 19.5 之间变化,变化幅度很小,也就是说在路堤工程中 3 种垫层的选用对桩土应力比  $n$  影响不大。

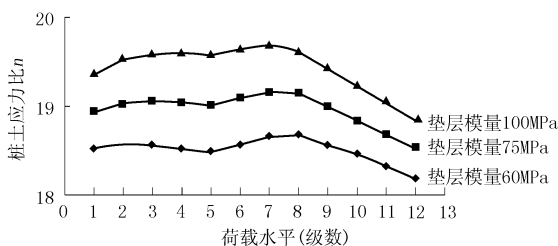


图 5 不同垫层模量下桩土应力比  $n$  随荷载水平的变化关系

### 2.4 桩间土桩端土模量比的影响

图 6 是不同桩端土与桩间土模量比下荷载水平与桩土应力比  $n$  的关系。从图中可以看出,不同桩端土与桩间土模量比下,桩土应力比随荷载水平呈现不同的变化规律:当  $E_{s2}/E_{s1} = 1$  时,即桩端土较软,加载初期桩就开始刺入桩端土,桩土应力同时增大,但桩的应力增幅大于土应力增幅,表现出桩土应力比  $n$  有个增大的过程;当荷载水平达到 3 级时桩土应力比  $n$  达到最大,之后随着荷载的继续增大,桩的应力增幅开始小于土的应力增幅,导致桩土应力比  $n$  下降。当  $E_{s2}/E_{s1} \geq 2$  时,由于桩端土较硬,桩土应力比  $n$  在加载初期达到最大,之后随荷载水平的增大,荷载开始向桩间土转移,使得桩土应力比  $n$  减小。当  $E_{s2}/E_{s1} < 4$  时,桩土应力比  $n$  变化幅度不大,即对荷载水平不敏感;当  $E_{s2}/E_{s1} \geq 4$  时,桩土应力比  $n$  变化幅度较大,即对荷载水平比较敏感。

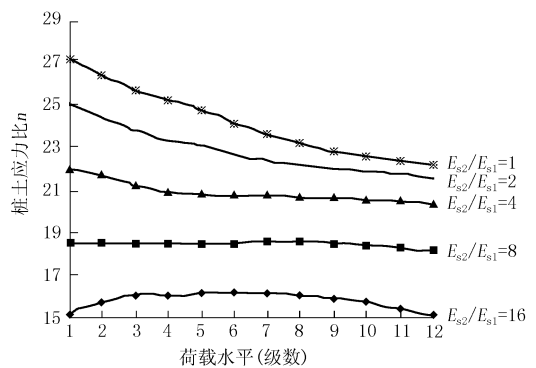


图 6 不同桩端土与桩间土模量比下荷载水平与桩土应力比关系

### 2.5 路堤土模量的影响

图 7 是不同路堤土模量下荷载水平与桩土应力比  $n$  的关系。

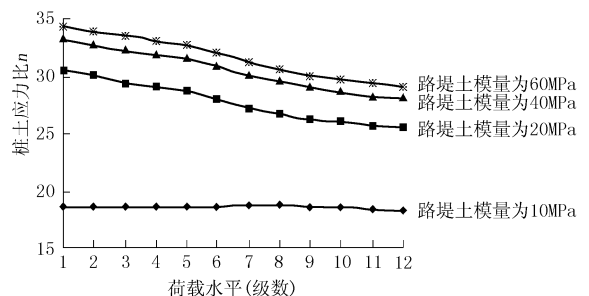


图 7 不同路堤土模量下荷载水平与桩土应力比  $n$  的关系

当路堤模量为 10 MPa 时,桩土应力比  $n$  随荷载的增大几乎不变;当路堤土模量增大到 20 MPa 以后,桩土应力比  $n$  与荷载水平的关系表现出荷载初期达到最大,之后随荷载水平的增加而减小的相同规律。同一级荷载水平下,路堤土模量从 10 MPa 增

长到 20 MPa 时,桩土应力比  $n$  增幅较大;而当路堤土模量  $\geq 20$  MPa 时,桩土应力比  $n$  随路堤土模量的增大增幅较小。

### 3 结论与建议

(1) 柔性基础由于其刚度较小,较容易发生变形,使基础、桩体和桩间土变形比较协调,从而可以很好地调整基底压力分布,使得复合地基中桩体和桩间土更好的发挥它们的承载能力。

(2) 通过对柔性基础下 CFG 桩复合地基中桩土应力比  $n$  的影响因素研究发现,桩长和桩与桩间土模量是影响桩土应力比  $n$  的最主要参数,改变它们的值可有效调控桩土应力比  $n$ 。如桩长从 5 m 到 25 m 内变化时,桩土应力比的变化范围为 5 增大到 22,桩与桩间土模量比从 25 到 200 时,桩土应力比从 5 增大到 34。

(3) 垫层效应主要体现在垫层厚度对桩土应力比的影响上,不同模量垫层对桩土应力比影响不大,但不同厚度垫层对桩土应力比有不同的影响。当垫层厚度  $> 1$  m 时,桩土应力比  $n$  随垫层增厚而增大;

当垫层厚度超过 1 m 时,对桩土应力比影响很小。建议用 CFG 桩复合地基处理路基时,垫层的厚度不要超过 1 m,具体数值可根据设计的实际需要进行确定。

(4) 当路堤土材料与垫层模量接近时,可以不考虑路堤土对桩土应力比的影响,当路堤土材料与垫层相差较大时,需考虑路堤土对桩土应力比的影响。

### 参考文献:

- [1] 阎明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 谢晓华,李万正. CFG 桩在高速公路工程中的应用[J]. 水运工程,2004,(2).
- [3] 吴慧明,龚晓南. 刚性基础与柔性基础下复合地基模型试验对比研究[J]. 土木工程学报,2001,34(5).
- [4] 朱云升,郭忠印,丘作中. 柔性基础复合地基桩土应力比的有限元分析[J]. 武汉理工大学学报,2004,(2).
- [5] 冯瑞玲,谢永华. 路堤荷载作用下复合地基的计算机辅助试验仿真分析[J]. 土木工程学报,2004,(1).
- [6] 庄茁,张帆,岑松,等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.

### (上接第 26 页)

状况下最大扭矩,且不至于超载而迫使发动机转速下降。根据成孔的地质状况和成孔的大小,还可以设置功率模式(重负荷工况  $M_0$ 、中负荷工况  $M_1$  和重负荷工况  $M_2$ )。RC2-2 控制器通过压力传感器可读取当先导压力,这样当操纵手柄放到中位后,5 s 发动机即可转为自动怠速以节省燃油。

### 3 结语

本文从柴油机工作原理出发,阐述了对柴油机进行节能控制的必要条件,提出了旋挖钻机动力系统功率匹配的概念。以内蒙古北方重型汽车股份有限公司的 NR2203 型钻机为例,在保证液压系统完全正常工作的情况下,对旋挖钻机动力系统重新进行功率匹配。应用电子极限负荷控制使 NR2203 型钻机实现以下目标:

(1) 极限负荷控制,使发动机由原来的非电控

改为电控方式,节省了部分功率,燃油消耗对比降低了 10%;

(2) 液压泵与发动机的功率匹配得到了优化;

(3) 实现了发动机自动怠速功能。

三者配合使钻机工作在高效节能状态,同时能适应多种标号和质量燃油、多种自然条件,保证了旋挖钻机的高效节能和适应各种工作环境的能力。

### 参考文献:

- [1] 曹恒,孙宝元,等. 柴油机模糊自校正 PID 控制器[J]. 大连理工大学学报,.
- [2] 王晨,应富强. 液压挖掘机的智能化节能控制策略[J]. 浙江工业大学学报,2000,28(2).
- [3] 郭晓芳,李伟哲,等. 液压挖掘机的发动机-泵的联合控制系统研究[J]. 同济大学学报,1999,(6).
- [4] 郭宽明. CAN 总线原理和应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1996.
- [5] 张铁. 液压挖掘机结构原理及使用[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2002.