

文章编号: 1000-7598-(2008) 05-1275-05

# CFG 桩复合地基现场试验及有限元模拟分析

黄生根

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 在褥垫状态或路堤荷载作用下复合地基的破坏主要取决于桩-褥垫体系的作用, 复合地基中单桩的承载力远未发挥出来。由有限元计算结果得出以下规律: (1) 随着褥垫厚度增加, 桩土应力比减小; 褥垫厚度超过 300 mm 后, 褥垫厚度的影响急剧减小; 褥垫厚度超过 500 mm 后, 褥垫厚度的影响继续减小。(2) 褥垫厚度较薄时 ( $h = 100$  mm), 褥垫模量对桩土应力比影响很大; 褥垫厚度超过 300 mm 时, 褥垫模量对桩土应力比的影响减小; 褥垫厚度达到 500 mm 后, 褥垫模量对桩土应力比影响很小。(3) 承载板刚度小于  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  时, 桩土应力比随刚度增大; 承载板刚度大于  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  时, 刚度对桩土应力比的影响很小。

**关 键 词:** CFG 桩复合地基; 有限元法; 桩土应力比; 褥垫

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

## Test study and finite element analysis of CFG composite foundation

HUANG Sheng-gen

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** According to the results of in-situ tests, the failure mechanism of composite foundation is mainly decided by the interaction between soil and cushion in the state of thick cushion or under embankments; and the practical bearing capacity of a pile in composite foundation is not brought into full play. The following rules are got from the calculation results of FEM: (1) the stress ratio of pile to soil ( $n$ ) decreases with the thickness increasing; as the thickness exceeds 300 mm, the influence of cushion thickness on  $n$  reduces sharply; as the thickness exceeds 500 mm, the influence of cushion thickness is small. (2) When the cushion thickness is relatively thin ( $h = 100$  mm), the influence of cushion modulus on  $n$  is great; as the thickness exceeds 300 mm, the influence decreases; as the thickness exceeds 500 mm, the influence is very small. (3) as the rigidity of bearing plate is smaller than  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ , the stress ratio of pile to soil increases with the rigidity increasing; as the rigidity exceeds  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ , the influence of rigidity on  $n$  is very small.

**Key words:** CFG composite foundation; finite element method; stress ration of pile to soil; cushion

## 1 前 言

CFG 桩是在碎石桩的基础上发展起来的, 它与垫层、桩间土一起构成复合地基。在钢筋混凝土刚性基础下, 由于基础本身刚度比较大, 垫层一般较薄, 桩顶应力远大于桩间土的应力, 桩土应力比较大。而对于路堤等柔性荷载作用下(或褥垫很厚)的情况, 由于其本身的刚度比较小, 比较容易发生变形, 桩土应力比相对刚性基础要小, 且桩相对刺入垫层或柔性基础中的趋势更明显, 桩的强度发挥相对刚性基础更不充分。

目前国内外对于复合地基工作性状的研究主要

集中于刚性基础下复合地基, 对柔性基础下复合地基工作性状的研究有一些初步成果, 但还不够深入。本文结合现场试验和有限元分析, 对柔性荷载作用下(或褥垫很厚条件下)CFG 桩复合地基的作用特性进行研究。

## 2 CFG 桩复合地基的现场试验

### 2.1 工程概况

武汉至广州客运专线韶关至花都段线路由北向南行进, 经清远县, 进入广州市花都区。线路经过低山河谷区、低山丘陵区 and 珠江三角洲平原区, 全段设计正线线路长 159.240 km, 其中正线路基长

39.391 km, 地基处理线路长 14.207 km。武—广客运专线设计时速为 350 km/h, 路基变形和工后沉降量要求严格, 对路基处理的设计和施工质量提出了很高的要求。

设计的地基处理措施中包括 CFG 桩复合地基。为了解 CFG 桩复合地基的承载特性, 并评价处理方案的加固效果, 选择了一处代表性场地进行现场试验, 试验内容包括单桩静载试验、单桩复合地基静载试验以及桩土应力测试。

场地覆盖土层为第四系全新统冲积层、坡残积层, 下伏基岩为上古生界泥盆系上统天子岭组灰岩。

## 2.2 现场试验结果及分析

### 2.2.1 单桩静载试验结果

试验桩采用长螺旋钻管内泵送混凝土工艺施工, 桩长 20 m, 桩径为 0.5 m。单桩静载荷试验采用慢速维持荷载法, 最大堆载为 2 000 kN, 每级加载为预估极限荷载的 1/10, 第一级荷载可按 2 倍的分级荷载加荷。在加载过程中, 前 8 级沉降均较稳定, 加载至第 9 级 1 800 kN 时, 桩顶出现陡降, 油压急剧下降, 说明桩已破坏。该桩的极限承载力为 1 600 kN。图 1 为单桩的  $Q$ - $S$  曲线。

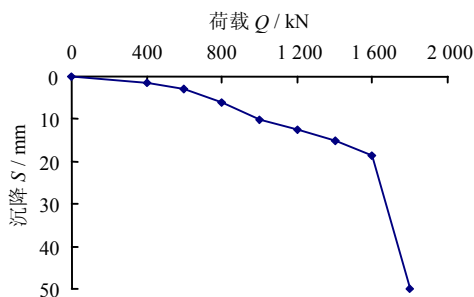


图 1 单桩的  $Q$ - $S$  曲线  
Fig.1 The  $Q$ - $S$  curve of the single pile

### 2.2.2 单桩复合地基静载试验及土压力测试结果

#### (1) 复合地基静载试验

单桩复合地基试验的桩长 20 m, 桩径为 0.5 m。单桩复合地基试验承压板尺寸为 1.415 m×1.2 m, 垫层厚度为 600 mm, 采用级配碎石。试验采用慢速维持荷载法, 最大堆载为 1 600 kN, 分 9 级, 每级 160 kN, 第一级为 320 kN。试坑中共埋设土压力盒 7 个, 桩顶一个, 桩间土 6 个, 埋设仪器布置见图 2。试验得到的复合地基荷载沉降关系曲线见图 3。在试验过程中, 沉降一直较稳定, 至第 7 级时, 沉降量为 62.84 mm, 压应力达到 659 kPa, 终止加载。

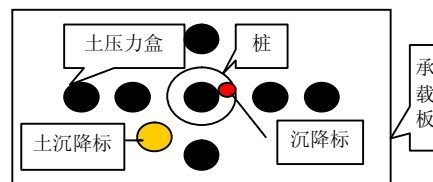


图 2 埋设仪器布置  
Fig.2 Arrangement of instruments

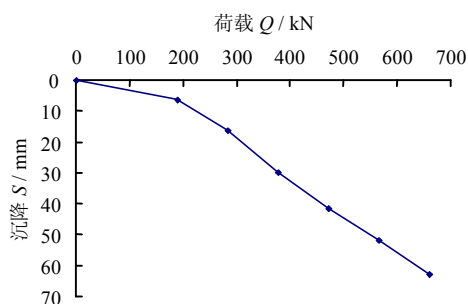


图 3 复合地基的  $Q$ - $S$  曲线  
Fig.3  $Q$ - $S$  curve of composite foundation

按照复合地基载荷试验要点, 取  $s/b = 0.01$  对应的荷载为复合地基承载力特征值,  $s = 12$  mm 时, 对应的荷载为 244 kPa, 则单桩复合地基承载力特征值为 244 kPa。

#### (2) 桩顶荷载-沉降关系

根据桩顶埋设的土压力盒和桩顶沉降标可得到复合地基中桩的荷载-沉降关系, 试验结果见图 4。复合地基中桩的最大沉降为 4.3 mm, 发挥的承载力为 56.5 kN, 占单桩极限值的 35.3 %, 荷载负担比为 50.4 %。

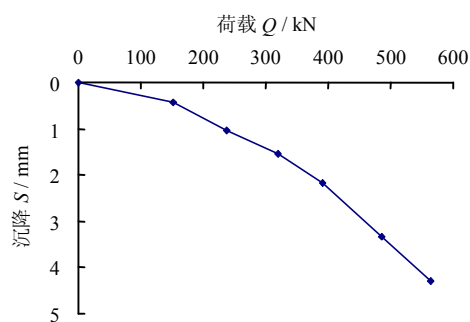


图 4 复合地基中桩的  $Q$ - $S$  曲线  
Fig.4  $Q$ - $S$  curve of the pile in composite foundation

#### (3) 褥垫层变形

根据复合地基试验过程中对总沉降和桩间土沉降进行的测试, 可得褥垫层在荷载作用下的变形值, 见图 5。在最大试验荷载作用下, 褥垫层的变形量为 30 mm, 占总沉降的 47.7 %。

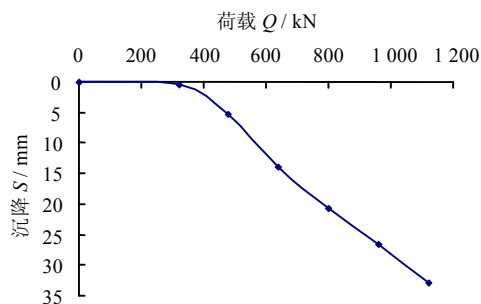


图5 褥垫层荷载-变形曲线

Fig.5  $Q$ - $S$  curve of cushion

#### (4) 桩土应力比

实测的桩土应力比与荷载关系见图6。当压应力小于 600 kPa 时, 桩土应力随压应力增加而增加; 当压应力大于 600 kPa 时, 桩土应力随压应力增加而减少; 桩土应力比与压应力的关系存在一个峰值。由于桩的承载力远未发挥出来, 说明桩在褥垫层中进入了塑性状态。

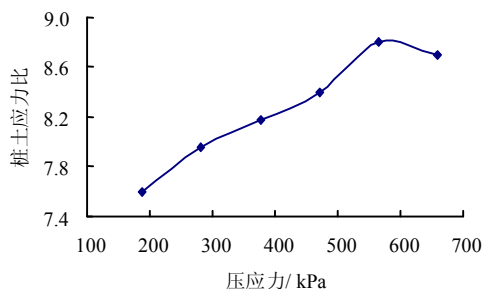


图6 桩土应力比与荷载关系曲线

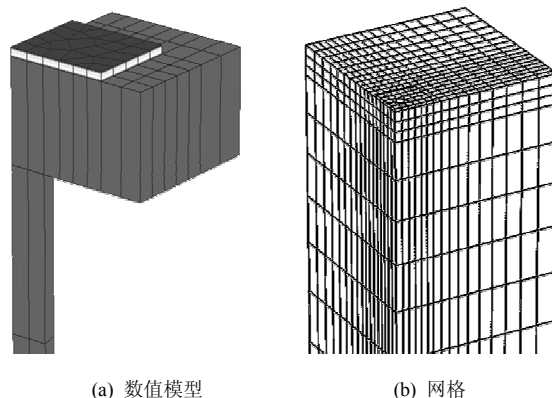
Fig.6 The curve of pile-soil stress ratio vs. load

### 3 CFG 桩复合地基承载特性的有限元分析

#### 3.1 计算模型

计算时土的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型, 桩体混凝土和承载板采用线弹性模型, 考虑桩土之间的相对滑动。桩长取 20 m 进行计算, 桩直径取 500 mm, 褥垫厚度取  $h=100, 300, 500$  mm 和 700 mm, 竖向边界取 40 m, 侧向边界取 6 m。

模型土表面为自由边界, 土侧和土的底部取为固定支座。为减少单元网格, 考虑到模型的轴对称性, 取 1/4 进行计算。对称面上的边界条件为: 约束垂直于对称面方向的位移。网格中, 对三角形单元采用 6 节点等参数单元, 对四边形单元采用 8 节点等参数单元。图7为数值模型及网格。



(a) 数值模型

(b) 网格

图7 数值模型及网格

Fig.7 Numerical model and mesh

#### 3.2 计算模型的检验

为便于计算, 假定土体和桩体为均质材料, 承载板或桩顶作用均布荷载。混凝土的泊松比  $\nu=0.2$ , 弹性模量  $E=20$  GPa, 土体参数见表1, 为试桩地层参数的加权平均值, 图8为 20 m 单桩计算值与试验值的对比。有限元结果与静载试验结果相比表明, 虽然有一定的误差, 但从总体上看, 两者基本接近, 说明计算模型和参数的选择基本合理。

表1 土体参数

Table 1 Parameters of soil

| 参数 | $c$ / kPa | $\phi$ / (°) | $E$ / MPa | $K_0$ | $\nu$ |
|----|-----------|--------------|-----------|-------|-------|
| 量值 | 20        | 20           | 10        | 0.6   | 0.3   |

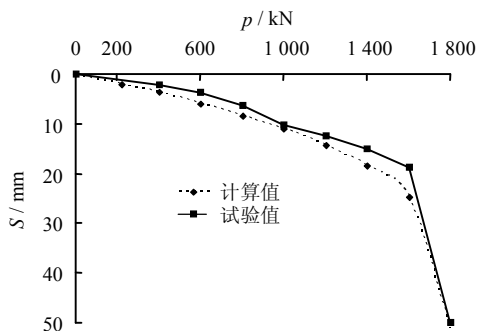


图8 有限元计算值与试验值的对比

Fig.8 The contrast of FEM results and static test results

#### 3.3 有限元计算结果分析

为分析各参量对复合地基特性的影响, 取不同的褥垫厚度、褥垫模量、路基刚度等进行计算, 荷载取 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 kPa 共 7 种情况。

##### (1) 褥垫厚度对桩土应力的影响

由有限元计算结果(图9)可见, 随着褥垫厚度增加, 桩土应力比减小, 褥垫厚度超过 300 mm

后, 曲线出现拐点, 褥垫厚度的影响急剧减小; 褥垫厚度超过 500 mm 后, 褥垫厚度的影响继续减小, 特别是当褥垫模量大于 60 MPa 时, 桩土应力比变化很小。

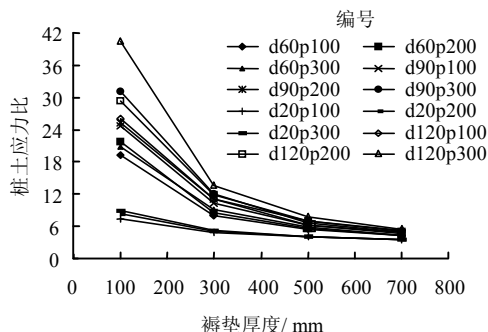


图 9 褥垫厚度对桩土应力的影响  
Fig.9 The influence of cushion thickness on pile-soil stress ratio

### (2) 褥垫模量对桩土应力的影响

图 10 为荷载  $p = 300$  kPa 时的褥垫模量-褥垫厚度-桩土应力比关系曲线。可以看出以下规律: (1) 褥垫厚度  $h = 100$  mm 时, 褥垫模量对桩土应力比影响很大, 基本呈线性增长, 桩土应力比由 8.62 增长到 40.4; (2) 褥垫厚度  $h = 300$  mm 时, 褥垫模量对桩土应力比有一定影响, 桩土应力比由 5.34 增长到 13.6, 但模量达到 90 MPa 后变化很小; (3) 褥垫厚度达到 500 mm 后, 褥垫模量对桩土应力比影响较小, 桩土应力比由 3.41~4.08 增长到 5.54~7.76。

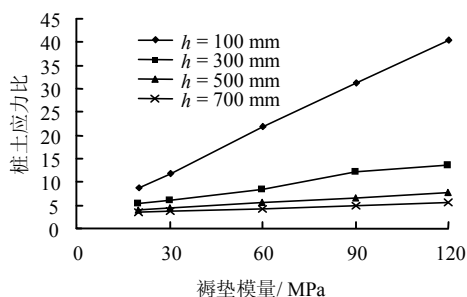


图 10 褥垫模量对桩土应力的影响 ( $Q=300$  kPa)  
Fig.10 The influence of cushion modulus on pile-soil stress ratio ( $Q=300$  kPa)

### (3) 路基刚度对桩土应力比的影响

通过变化承载板的尺寸和弹性模量可模拟路基刚度对复合地基变形特性的影响。图 11 为不同褥垫厚度、不同承载板刚度情况下桩土应力比与荷载关系曲线。图 12 和图 13 为承载板刚度与桩土应力比关系曲线, 由两图可得出以下规律: (1) 承载板

刚度小于  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  时, 桩土应力比随刚度增大; 承载板刚度大于  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  时, 刚度对桩土应力比的影响很小。(2) 对褥垫厚度为 300 mm 的情况, 当荷载在 500 kPa 以内时, 曲线基本呈递增关系; 当荷载超过 500 kPa 后, 曲线在  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  处存在峰值。(3) 对褥垫厚度为 500 mm 的情况, 当荷载在 500 kPa 以内时, 曲线基本呈递增关系, 在  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  处存在拐点; 当荷载超过 500 kPa 以后, 曲线基本平直, 桩土应力比基本不受承载板刚度影响。

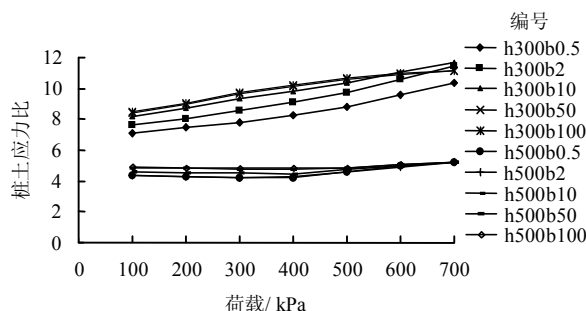


图 11 桩土应力比与荷载关系曲线  
Fig.11 The curves of pile-soil stress ratio vs. load

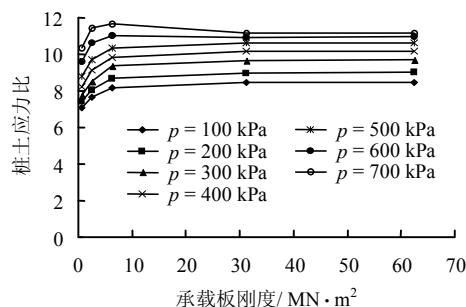


图 12 承载板刚度与桩土应力比关系曲线  
(褥垫厚度  $h=300$  mm)

Fig.12 The curves of pile-soil stress ratio vs. rigidity of bearing plate ( $h=300$  mm)

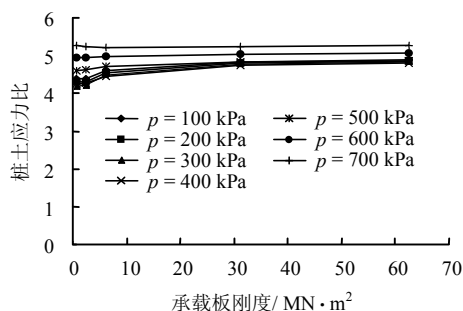


图 13 承载板刚度与桩土应力比关系曲线  
(褥垫厚度  $h=500$  mm)

Fig.13 The curves of pile-soil stress ratio vs. rigidity of bearing plate ( $h=500$  mm)

上述规律说明,当路基高度达到一定值后(路基模量一般为定植),可不考虑其刚度对桩土应力比的影响。

## 4 结 论

(1) 通过单桩静载试验、单桩复合地基静载试验、复合地基桩土应力测试及桩土表面沉降测试,得到了 CFG 桩复合地基在厚褥垫条件下的有关作用特性。复合地基中单桩发挥的承载力仅占极限值的 35.3%,在复合地基中的荷载负担比为 50.4%,桩的承载力远未发挥出来。桩土应力比与压应力的关系存在一个峰值,说明桩在褥垫层中进入了塑性状态,产生向上刺入破坏。所以,在厚褥垫状态或路堤荷载作用下,复合地基的破坏往往取决于桩-褥垫体系的作用。

(2) 根据有限元计算结果,随着褥垫厚度增加,桩土应力比减小。褥垫厚度超过 300 mm 后,褥垫厚度的影响急剧减小;褥垫厚度超过 500 mm 后,褥垫厚度的影响继续减小,特别是当褥垫模量大于 60 MPa 时,桩土应力比变化很小。

(3) 褥垫厚度较薄时( $h=100$  mm),褥垫模量对桩土应力比影响很大,基本呈线形增长;褥垫厚度超过 300 mm 时,褥垫模量对桩土应力比的影响减小;褥垫厚度达到 500 mm 后,褥垫模量对桩土应力比影响很小。

(4) 采用承载板刚度模拟路基刚度对复合地基变形特性的影响。承载板刚度小于  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  时,桩土应力比随刚度增大;承载板刚度大于  $6.25 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$  时,刚度对桩土应力比的影响很小。

## 参 考 文 献

- [1] 陈善雄, 许锡昌, 赵文光. 柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 274—278.
- [2] 何结兵, 洪宝宁, 丘国锋. 高速公路 CFG 桩复合地基褥垫层作用机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 663—1 666.
- HE Jie-bing, HONG Bao-ning, QIU Guo-feng. Research on cushion action mechanism of CFG pile composite foundation for expressway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1 663—1 666.
- [3] 朱云升, 胡幼常. 柔性基础复合地基力学性状的有限元分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 396—404.
- ZHU Yun-sheng, HU You-chang. Finite element analysis of mechanical behaviors of flexible foundation and composite ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 396—404.
- [4] 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, (5): 81—83.
- WU Hui-ming, GONG Xiao-nan. Model tests on composite ground under soft and stiff foundation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, (5): 81—83.
- [5] CHEUNG Y K, THAM LG, GUO D J. Analysis of pile group by infinite layer method[J]. **Geotechnique**, 1988, 38(3): 415—431.
- [6] 黄生根, 龚维明. 大直径超长桩压浆后承载性能的试验研究及有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 297—301.
- HUANG Sheng-gen; GONG Wei-ming. Test study and finite element analysis of bearing behavior of large diameter overlength piles after grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 297—301.

## 高拱坝地质力学模型试验方法及其应用

(简明土木工程系列专集)

建筑科学类 著 者: 周维恒 林 鹏 等 出版时间: 2008 年 1 月 开 本: 大 32K 页数: 269 装 帧: 平装  
标准书号: ISBN 978—7—5084—5225—8 定价: ¥16.00 元

本书首先概述了地质力学模型试验的意义、特点、要求和方法及分类,然后介绍了拱坝整体地质力学模型试验理论方法、加载技术、测量技术,并进行了拱坝地质力学模型试验实例分析,与国内外主要拱坝的整体稳定试验比较。

读者对象: 拱坝设计、研究、模型试验人员。

(信息来源: 新华书目报)