

# 基于三次曲线模型 CFG 桩复合地基中性点位置计算

鄧 彬<sup>1</sup>, 李 戈<sup>2</sup>, 武李和乐<sup>1</sup>, 郭 洁<sup>3</sup>, 任 兴<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;  
3. 陕西省建筑设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 为更好的体现桩侧摩阻力变化, 将桩侧摩阻力随深度的关系变化曲线用三次曲线方程  $z = k\tau^3 + C$  代替, 考虑桩土变形协调, 建立平衡方程推导出 CFG 桩复合地基含有中性点位置的表达式与极限承载力表达式; 依据现场 CFG 桩复合地基高应力静载荷试验数据对表达式进行对比验证. 对比结果表明基于三次曲线模型并考虑桩土变形协调下计算结果具有合理性; 结合表达式, 探究不同褥垫层厚度与桩径对中性点位置的影响并讨论其影响机制. 结论可为 CFG 桩复合地基的研究提供一定的参考价值.

**关键词:** 三次曲线模型; CFG 桩复合地基; 中性点; 褥垫层厚度; 桩径

**中图分类号:** TU472.2<sup>+</sup>1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)03-0350-05

## Calculation of neutral point location of CFG pile composite foundation based on the model of cubic curve

ZHI Bin<sup>1</sup>, LI Ge<sup>2</sup>, WU Lihale<sup>1</sup>, GUO Jie<sup>3</sup>, REN Xin<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science And Technology Xi'an 710054, China;  
2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China;  
3. Shaanxi Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In order to better reflect the change of pile side friction resistance, Instead of The Model of Cubic Curve by relation curve of side friction of pile depth, Considering deformation compatibility of pile and soil, The expression of neutral point position and the expression of ultimate bearing capacity of CFG pile composite foundation are derived by establishing the equilibrium equation; on the basis of field of CFG pile the composite foundation of high stress compared to the expression data of static load test results show that The Model of Cubic Curve and considering the deformation of pile and soil under the coordination of calculated results is reasonable based on the combination of research; expression, different thickness of cushion and pile diameter on the position of the neutral point and discuss its influence mechanism. The conclusion can provide some reference value for the study of CFG pile composite foundation.

**Key words:** the model of cubic curve; CFG pile composite foundation; neutral point; cushion thickness; pile diameter

CFG 桩复合地基在地基加固中取得了良好的工程效益<sup>[1]</sup>, 但其作用机理尚不清楚, 而探究机理的关键一步在于获取较为准确的中性点位置. 由于中性点位置目前尚无直接获取有效准确方法, 故已有研究成果对于中性点位置的获取多采用理论研究的方法<sup>[2-7]</sup>. 目前对中性点位置的理论研究中, 假定桩侧摩阻力随深度的变化曲线多采用简化的直线代替, 与实际有较大的误差, 存在一定的局限性.

本文将桩侧摩阻力随深度的变化关系用三次曲线方程  $z = k\tau^3 + C$  代替, 考虑桩土变形协调, 建立平衡方程, 推导出 CFG 桩复合地基中性点位置的表达式, 依据现场 CFG 桩复合地基静载荷试验数据, 计算得出中性点具体位置. 依据现场 CFG 桩复合地基高应力静载荷试验数据与表达式进行对比, 并探究不同褥垫层厚度与桩径对中性点位置的影响, 讨论其影响机制.

收稿日期: 2018-03-02 修改稿日期: 2019-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172262); 陕西省重点科技创新团队计划项目(2014KCT-30)

第一作者: 鄧 彬(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土结构性、黄土基坑加固等方面的科研和教学工作. E-mail: xianzhibin@163.com

通信作者: 武李和乐(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程加固理论与技术方面的研究. E-mail: 326200464@qq.com

## 1 基本原理与公式推导

### 1.1 基本假定

①桩侧摩阻力随深度的关系变化曲线为三次曲线方程  $z = k\tau^3 + C$ , 其中,  $z$  为土体深度,  $\tau$  为桩体侧摩阻力。

②单元体法向位移为零且不考虑侧面剪力;

③不考虑桩体的径向变形。

### 1.2 建立计算模型

当CFG桩承担上覆载荷产生向下运动趋势或位移时, 桩体受到土体方向向上的侧摩阻力, 称为正摩阻力。反之, 当桩土之间产生沉降差, 即桩相对于土体有向上运动或向上运动趋势时, 则桩体受到土体提供的负摩阻力。负摩阻力与正摩阻力相等的点称之为中性点。中性点位置所对应的负摩阻力为零, 在  $z=0$  处桩体与桩间土相对位移最大, 因此该处负摩阻力最大, 最大负摩阻力参考Berrum公式。摩阻力表达如下:

$$\tau_0 = K \tan \varphi \sigma_s + c \quad (1)$$

式中:  $\varphi$  为桩周土体内摩擦角,  $c$  为黏聚力,  $K$  为土体被动土压力系数,  $\sigma_s$  为桩间土表面竖向应力, 可由文献[5]得到。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \frac{\alpha_2 P}{\alpha_1 m + \alpha_2 (1 - m)} \\ \alpha_1 &= \frac{l_0}{E_s} + c_u - \frac{\lambda k \tan \varphi l_0^2}{3E_s} - \frac{\gamma k \tan \varphi l_0^2}{3E_p} \\ \alpha_2 &= c_u + \frac{l_0}{E_p} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

假设桩体侧摩阻力变化曲线方程为  $z = k\tau^3 + C$ , 则

$$\tau(z) = -\tau \sqrt[3]{z/l_0 - 1} \quad (3)$$

其中:  $l_0$  为中性点深度,  $\tau(z)$  正值时, 表示正摩阻力,  $\tau(z)$  负值时, 表示负摩阻力。

桩侧摩阻力随深度变化如图1所示:

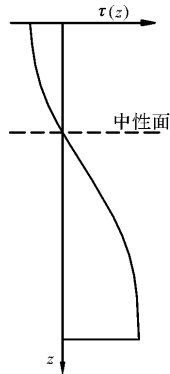


图1 桩身摩阻力随深度变化曲线图

Fig. 1 Diagram of friction resistance of pile body with depth

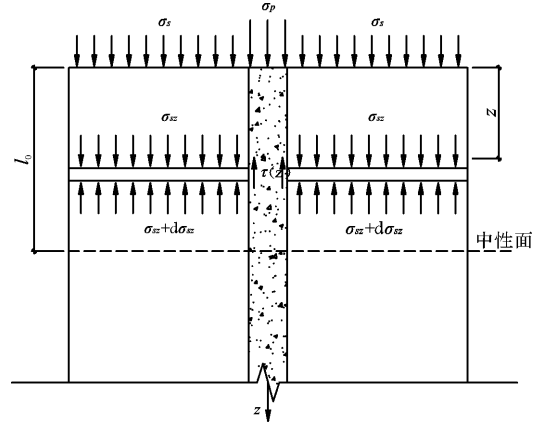


图2 桩间土微元体

Fig. 2 microelement of soil between piles

如图2所示, 在某深度  $z$  处取桩间土微单元体, 列竖向平衡方程, 即

$$\sigma_{sz} A_s - (\sigma_{sz} + d\sigma_{sz}) A_s - \tau(z) u_p dz = 0 \quad (4)$$

其中:  $\sigma_{sz}$  为中性点以上某深度  $z_0$  处土体应力,  $A_s$  为单元体桩间土面积,  $u_p$  为桩体横截面周长。

令  $\lambda = \frac{u_p}{A_s}$ , 整理式(4), 得

$$\frac{d\sigma_{sz}}{dz} + \lambda \tau(z) = 0 \quad (5)$$

将式(3)代入上式求解, 得

$$\sigma_{sz} = -\frac{3}{4} \lambda l_0 \tau_0 \left( \frac{z}{l_0} - 1 \right)^{\frac{4}{3}} + \frac{3}{4} \lambda l_0 \tau_0 + C_1 \quad (6)$$

将边界条件  $z=0$ ,  $\sigma_{sz} = \sigma_s$  代入式, 可解得  $C_1 = \sigma_s$ , 代回式, 得

$$\sigma_{sz} = -\frac{3}{4} \lambda l_0 \tau_0 \left( \frac{z}{l_0} - 1 \right)^{\frac{4}{3}} + \frac{3}{4} \lambda l_0 \tau_0 + \sigma_s \quad (7)$$

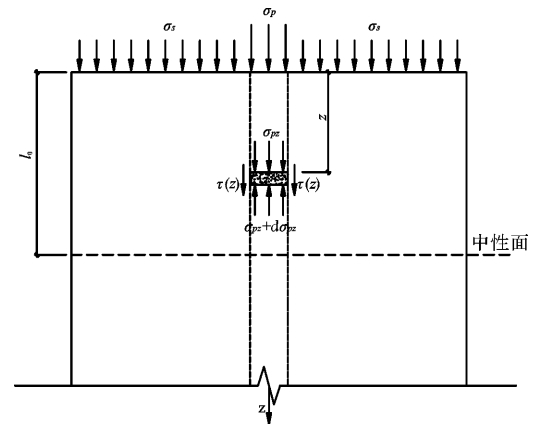


图3 CFG桩微元体

Fig. 3 microelement of CFG pile

如图3所示, 在中性点以上某深度  $z$  处取桩体微单元体, 列竖向平衡方程。

$$\sigma_{pz} A_p - (\sigma_{pz} + d\sigma_{pz}) A_p + \tau(z) u_p dz = 0 \quad (8)$$

其中:  $\sigma_{pz}$  为桩某深度  $z$  处桩身应力;  $A_p$  为桩身截面积。

令  $\lambda' = \frac{up}{Ap}$ , 整理式(8), 得

$$\frac{d\sigma_{pz}}{dz} - \lambda' \tau(z) = 0 \quad (9)$$

将式(3)代入式(9), 得

$$\sigma_{pz} = \frac{3}{4} \gamma l_0 \tau_0 (z/l_0 - 1)^{\frac{4}{3}} - \frac{3}{4} \gamma l_0 \tau_0 + C_1 \quad (10)$$

将边界条件  $z = 0$   $\sigma_{pz} = \sigma_p$  代入式(10), 可解得  $C_1 = \sigma_p$ , 代回式(10)可得:

$$\sigma_{pz} = \frac{3}{4} \gamma l_0 \tau_0 (z/l_0 - 1)^{\frac{4}{3}} - \frac{3}{4} \gamma l_0 \tau_0 + \sigma_p \quad (11)$$

### 1.3 中性点位置的确定

由式(7), 得桩间土中性点以上变形量  $S_{s\pm}$  与中性点位置以下变形量  $S_{s\mp}$ , 即

$$S_{s\pm} = \int_0^{l_0} \frac{\sigma_{sz}}{E_s} dz = \frac{3\lambda l_0^2 \tau_0}{7E_s} + \frac{l_0 \sigma_s}{E_s} \quad (12)$$

$$S_{s\mp} = \int_{l_0}^l \frac{\sigma_{sz}}{E_s} dz = -\frac{9\lambda l_0^2 \tau_0}{28E_s} (l/l_0 - 1)^{\frac{7}{3}} + \frac{l - l_0}{E_s} (\frac{3}{4} \lambda l_0 \tau_0 + \sigma_s) \quad (13)$$

式中,  $E_s$  为桩间土压缩模量, 由于土层性质不同, 取各层土的加权压缩模量, 即

$$E_s = \frac{E_{s1} l_1 + E_{s2} l_2 + \dots + E_{sx} l_x}{l} \quad (14)$$

式中,  $E_{s1}$ 、 $E_{s2}$ 、 $\dots$ 、 $E_{sx}$  为各土层的压缩模量,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $\dots$ 、 $l_x$  为各土层厚度。

CFG 桩在垫层中刺入深度  $\delta_1$  依据下式计算。

$$\delta_1 = c_u (\sigma_p - \sigma_s) \quad (15)$$

$c_u$  为桩顶作用于褥垫层的竖向刺入量。

$$c_u = \frac{L_c}{E_c} \quad (16)$$

其中,  $L_c$  为褥垫层厚度,  $E_c$  为褥垫层模量。

下卧层桩端入刺深度  $\delta_2$  采用下式计算。

$$\delta_2 = c_d (\sigma_{p1} - \sigma_{s1}) \quad (17)$$

其中,  $c_d$  为桩端在下卧层的竖向刺入量。

$$c_d = \frac{1}{K} = \frac{(1 - \mu_0^2) \tau_w \sqrt{A_d}}{E_0} \quad (18)$$

其中:  $\mu_0$  为桩端泊松比,  $K$  为桩端土体的基床系数,  $A_d$  为 CFG 桩底面积,  $\tau_w$  为沉降影响系数, 结合文献[6]取 0.97,  $E_0$  为桩端土压缩模量,  $\sigma_{p1}$ 、 $\sigma_{s1}$  表示桩端与桩间土。

考虑桩土协调变形, 桩间土压缩量等于 CFG 桩身刺入褥垫层与下卧层之和, 故有

$$S_{s\pm} + S_{s\mp} = \delta_1 + \delta_2 \quad (19)$$

将式(12), (13), (15), (17)代入式(19), 可解得中性点位置  $l_0$ 。

### 1.4 CFG 桩复合地基极限承载力确定

由于褥垫层多为砂砾碎石构成, 故不考虑褥垫层黏聚力对承载力的影响, 利用太沙基承载力

系数简化桩顶作用力  $q_{u1}$ 。

$$q_{u1} = \gamma_1 L_c N_q + \gamma_1 d N_\gamma \quad (20)$$

式中,  $N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_\gamma$  为承载力系数, 可查阅太沙基承载力系数图得出。

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi;$$

$$N_q = \frac{\exp[(3\pi/2 - \varphi) \tan \varphi]}{2 \cos^2(45^\circ + \varphi/2)}.$$

$$N_\gamma = [(K_{py}/2 \cos^2 \varphi) - 1] \tan \varphi/2;$$

依据文献[6],  $p_{u2}$  为桩端作用力, 等于桩端土的不排水抗剪强度与桩的承载力系数  $N_{c2}$  乘积。

$$q_{u2} = c'_{uc2} N_{c2} \quad (21)$$

其中,  $N_{c2}$  为桩承载力系数, 本文取  $N_{c2} = 9$ 。取桩体微单元体为研究对象, 对桩体中性点上下部分积分, 得到桩体侧摩阻力公式。

$$T = \pi d \left[ \int_l^{l_0} \tau(z) dz - \int_{l_0}^0 \tau(z) dz \right] \quad (22)$$

当桩顶先于桩端破坏时, 即

$$q_u = q_{u1} + T \quad (23)$$

当桩端先于桩顶破坏时, 即

$$q_u = q_{u2} + T \quad (24)$$

CFG 桩复合地基极限承载力公式为

$$q_u = \min(q_{u1} + T, q_{u2} + T) \quad (25)$$

## 2 计算公式验证

以西安市高新技术产业开发区某工程为背景。选取 21 m 试桩 3 个, 桩径 0.4 m, 桩间距 1.5 m, 编号分别取 SZ1, SZ2, SZ3。加载试验前将 150 mm 厚中粗砂均铺至复合地基表面, 并安装圆形刚性承压板。本次静载试验以混凝土堆积重物为反力, 加荷设备为 630 t 油压千斤顶, 第一级加荷为 240 kPa, 后每级增加 120 kPa 压力至 1 200 kPa, 再以每级 60 kPa 压力递增至 1 800 kPa, 进行高应力静载荷试验。根据土工室内试验及勘察报告, 确定土层及材料基本物理力学参数, 见表 1。

表 1 物理力学参数值

Tab. 1 parameter values of physical mechanics

| 材料名称 | 模量/<br>$K \cdot \text{Pa}^{-1}$ | 黏聚力/<br>$c \cdot \text{kPa}^{-1}$ | 内摩<br>擦角 | 厚度/m |
|------|---------------------------------|-----------------------------------|----------|------|
| 黄土质土 | 4.89e6                          | 28                                | 25       | 6.5  |
| 中细砂  | 8.07e6                          | 0                                 | 25       | 2.2  |
| 黄土   | 4.68e6                          | 30                                | 24       | 3.5  |
| 古土壤  | 4.82e6                          | 35                                | 25       | 5.1  |
| 粉质黏土 | 4.66e6                          | 35                                | 22       | 7.2  |
| 中粗砂  | 9.99e6                          | 0                                 | 35       | 2.2  |
| 粉质黏土 | 4.66e6                          | 35                                | 22       | 6.5  |
| 载荷板  | 1.05e9                          | /                                 | /        | /    |
| 桩体   | 5411e6                          | /                                 | /        | /    |
| 褥垫层  | 15e6                            | 0                                 | 38       | 0.15 |

将试验参数带入式(19)可得,中性点  $l_0 = 4.24$  m,查太沙基公式承载力系数表得,  $N_q = 43$ ,  $N_\gamma = 41$ .

其中:  $q_{u1} = \gamma_1 L_c N_q + \gamma_1 d N_\gamma$

$$= 23 \times 0.15 \times 43 + 23 \times 0.4 \times 41$$

$$= 526.5 \text{ kPa};$$

$$q_{u2} = c'_u N_{c2}$$

$$= 70 \times 9 = 630 \text{ kPa};$$

$$T = \pi d \left[ \int_l^{l_0} \tau(z) dz - \int_{l_0}^0 \tau(z) dz \right]$$

$$= \pi \times 0.4 \left[ \int_{21}^{4.24} \tau_0 \sqrt{\frac{21}{4.74} - 1} - \int_{4.24}^0 \tau_0 \sqrt{\frac{21}{4.74} - 1} \right] = 832.61 \text{ kPa}.$$

其中,桩侧摩阻力可由式(1)、(2)、(14)、(16)联立求得,由式(25)得:

$$q_u = \min(1359.11, 1462.61) = 1359.11 \text{ kPa}$$

复合地基静载荷试验结果如下所示.

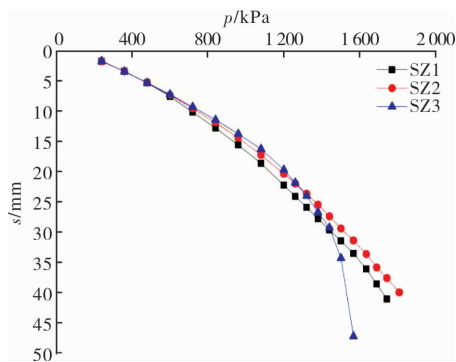


图4 高应力作用下复合地基 p-s 曲线

Fig. 4 p-s curve of composite foundation under high stress

如图4所示,当荷载加至到1300 kPa时,SZ3所对应曲线开始出现拐点,沉降变形增加明显,当沉降变形量增至上一级沉降变形量的2倍时,停止加载试验,SZ3对应荷载1620 kPa. SZ1与SZ2所对应曲线为缓变型,当其沉降量超过40 mm时,分别对应荷载值1740 kPa和1800 kPa.此时承压板周围褥垫层出现侧向挤出现象;依据相关规范,判定此时复合地基已经破坏,中止加载.综合三组试验,得到该场地CFG桩复合地基极限承载力为1720 kPa.

对比试验与计算结果,计算结果与试验误差率为26.5%,分析原因为计算模型建立需设定一系列假定条件,增大了误差;同时由于现场试验时在褥垫层厚度及模量设置上各试验桩不可避免的存在差异,导致计算结果与试验存在误差,但整体误差未超过30%,说明了该模型的合理性.

### 3 中性点的影响因素分析

本文取褥垫层厚度和桩径为变量,基于式(19)探究对中性点位置的影响.

#### 3.1 褥垫层厚度对中性点位置影响及分析.

褥垫层厚度分别选择150、250、350、450、550 mm,其余参数参考现场试验数据.

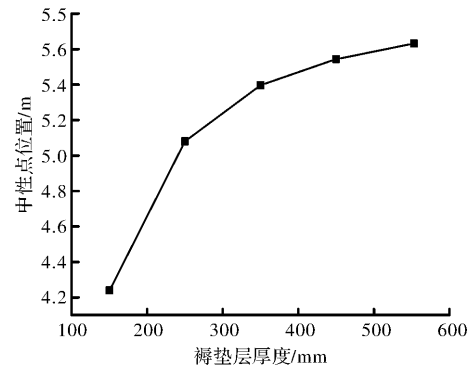


图5 不同褥垫层厚度对中性点位置的影响

Fig. 5 Effect of cushion thickness on the neutral point position

如图5所示,随着褥垫层厚度增加,中性点位置深度也随之增加,但幅度趋于平稳,最终稳定在5.7 m.分析原因为:褥垫层厚度变大,增加了褥垫层流动补偿能力,桩间土受力增加,使其沉降量增加,同时CFG桩向上刺入褥垫层,桩土沉降差变大,负摩阻力增强,中性点位置下移.随着褥垫层厚度增加,受荷时褥垫层被压密,CFG桩向上刺入程度减弱,桩土沉降差趋于稳定,负摩阻力增长缓慢,中性点位置趋于平稳.

#### 3.2 桩径对中性点位置的影响及分析

CFG桩桩径分别选择0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 m,其余参数参考现场试验数据.

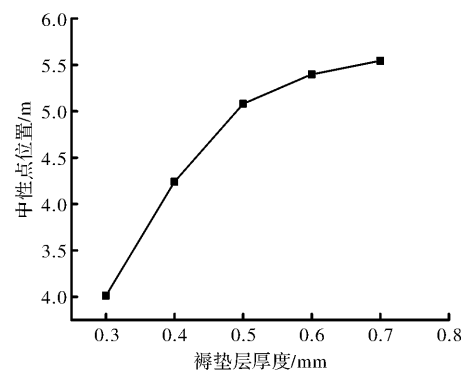


图6 不同桩径对中性点位置的影响

Fig. 6 Influence of different pile diameter on the position of neutral point

如图6所示,随着桩径的增加,桩身处中性点位置深度也随之增加,但增加幅度趋于平稳,其

位置深度稳定在 5.5m 左右. 分析原因为: 当桩径较小时, CFG 桩刺入褥垫层相对容易, 此时桩向上刺入褥垫层量较大, 桩土沉降差较大; 但随着桩径的增加, CFG 桩刺入褥垫层的难度增加, 刺入量的增加值减小, 桩土沉降差趋于稳定, 负摩阻力增长缓慢, 中性点位置趋于平稳.

## 4 结论

(1) 将桩侧摩阻力随深度关系变化曲线用三次曲线方程  $z = k\tau^3 + C$  代替, 考虑桩土变形协调, 建立平衡方程得出 CFG 桩复合地基中性点位置表达式与极限承载力表达式. 依据现场复合地基高应力静载荷试验, 与试验结果进行对比, 证明表达式的合理性.

(2) 利用所得表达式探究不同褥垫层厚度与桩径对中性点位置的影响, 结果表明: 随着褥垫层厚度与桩径的增加, 中性点的深度先增加, 后逐渐趋于稳定.

## 参考文献 References

- [1] 郑刚. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.  
ZHENG Gang. Summary of the development of foundation treatment technology[J]. Journal of Civil Engineering, 2012, 45(2): 127-146.
- [2] 何桥娇, 胡卫国. 考虑桩土界面负摩阻力的 CFG 桩复合地基沉降计算方法[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 40(3): 482-485.  
HE Qiaojiao, HU Weiguo. Settlement calculation method of CFG pile composite foundation based on negative friction between pile and soil[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 40(3): 482-485.
- [3] 赵明华, 胡倩, 杨超伟, 等. 考虑地基土非线性固结的桩侧负摩阻力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1418-1423.  
ZHAO Minghua, HU Qian, YANG Chaowei, et al. Study on calculation method of negative skin friction of pile side based on non-linear consolidation of foundation soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1418-1423.
- [4] 易发成. CFG 桩复合地基负摩阻力的几个问题[J]. 建筑技术, 2006, 37(3): 184-186.  
YI Facheng. Several problems of negative friction of CFG pile composite foundation[J]. Architectural Technology, 2006, 37(3): 184-186.
- [5] 武崇福, 郭维超, 李雨浓, 等. 考虑负摩阻的刚性桩复合地基中性面深度及桩土应力比计算[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 278-287.  
WU Chongfu, GUO Weichao, LI Yunong, et al. Neutral surface depth and pile-soil stress ratio calculation of rigid pile composite foundation based on negative friction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 278-287.
- [6] 云树春. 考虑桩土协调工作的 CFG 桩承载力计算新方法[J]. 工业建筑, 2011, 41(S1): 575-577.  
YUN shuchun. A new method for calculating the bearing capacity of CFG piles considering the coordination of pile and soil[J]. Industrial Building, 2011, 41(S1): 575-577.
- [7] 孔纲强, 周杨, 彭怀风. 负摩阻力作用下桩基中性点位置、下拽力及下拽位移与时间关系[J]. 中南大学学报(自然科学版) 2016, 47(11): 3885-3889.  
KONG Gangqiang, ZHOU Yang, PENG Huaifeng. The relationship between the position of neutral point, pull-down force and pull-down displacement of pile foundation under negative friction and time[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(11): 3885-3889.
- [8] 陈明, 李镜培, 梁发云, 等. 刚性桩复合地基负摩阻区深度的一种计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 955-959.  
CHEN Ming, LI Jingpei, LIANG Fayun, et al. A method for calculating the depth of negative friction zone of rigid pile composite foundation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 955-959.
- [9] 聂如松, 冷伍明. 负摩阻力作用下的单桩竖向承载性状[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1539-1544.  
NIE Rusong, LENG Wuming. Vertical bearing behavior of single pile under negative friction[J]. Journal of Zhongnan University(Science and Technology), 2013, 44(4): 1539-1544.
- [10] 彭小勇, 杨胜波, 魏晓楠. 基于改进的 Brauns 理论碎石桩极限承载力计算模型研究[J]. 中外公路, 2014, (4): 20-23.  
PENG Xiaoyong, YANG Shengbo, WEI Xiaonan. Research on ultimate bearing capacity calculation model of gravel pile based on improved Brauns theory[J]. China-Foreign Highway, 2014, (4): 20-23.

- Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [11] 张文佳,李慧民,赵地. 基于可信性测度理论的装配式建筑施工过程风险性评估[J]. 工业安全与环保, 2017,43(8):13-17,86.
- ZHANG Wenjia, LI Huimin, ZHAO Di. Risk assessment of prefabricated construction process based on the credibility measure[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017,43(8):13-17,86.
- [12] 王光远. 未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990,23(4):1-8.
- WANG Guangyuan. Uncertainty Information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990,23(4):1-8.
- [13] 裴兴旺,李慧民,孟海,等. 多因素耦合作用下建筑火灾后加固施工过程风险性评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2016,12(7):156-162.
- PEI Xingwang, LI Huimin, MENG Hai, et al. Risk assessment on reinforcement construction process of post-fire building by multiple-factor coupling [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7):156-162.
- [14] 阳富强,吴超. 基于未确知测度理论的硫化矿石爆堆自燃危险性评价[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010,41(6):2373-2380.
- YANG Fuqiang, WU Chao. Risk assessment on spontaneous combustion of sulfide ore dump in stope based on uncertainty measurement theory [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010,41(6):2373-2380.
- [15] 宫凤强,李夕兵,董晓军,等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(2):323-330.
- GONG Fengqiang, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2):323-330.
- [16] 王新民,王石,鄢德波,等. 基于未确知测度理论的充填管道堵塞风险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2012,22(4):151-156.
- WANG Xinmin, WANG Shi, YAN Debo, et al. Risk assessment on blocking of filling pipeline based on uncertainty measurement theory [J]. China Safety Science Journal, 2012,22(4):151-156.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 354 页)

- [11] 杨明辉,李军,赵明华. 考虑侧阻增强效应的基桩极限承载力解析算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(5): 1032-1038.
- YANG Minghui, LI Jun, ZHAO Minghua. Analytical algorithm for ultimate bearing capacity of piles based on lateral resistance enhancement effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, (5): 1032-1038.
- [12] 高翔,张可能,郭勇,等. 考虑负摩阻力的刚性桩复合地基桩土应力比计算[J]. 四川建筑科学研究, 2016(2):64-69.
- GAO Xiang, ZHANG Keneng, GUO Yong, et al. Calculation of pile-soil stress ratio of rigid pile composite foundation based on negative friction[J]. Sichuan Architectural Science Research, 2016(2): 64-69.
- [13] 张钦喜,刘新. CFG 桩复合地基承载力计算新公式模拟研究[J]. 广东土木与建筑, 2014(2):3-6.
- ZHANG Qinxi, LIU Xin. A simulation study of a new formula for calculating the bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. Guangdong Civil and Architecture, 2014(2): 3-6.
- [14] 张钦喜,郑玉苹,陈鹏. CFG 桩复合地基沉降计算方法的修正[J]. 岩土工程技术, 2015(2):100-104.
- ZHANG Qinxi, ZHENG Yuping, CHEN Peng. Modification of settlement calculation method for CFG pile composite foundation [J]. Geotechnical Engineering Technology, 2015(2): 100-104.
- [15] 佟建兴,胡志坚,闫明礼,等. CFG 桩复合地基承载力确定[J]. 土木工程学报, 2005(7):87-91.
- TONG Jianxing, HU Zhijian, YAN Mingli, et al. Determination of bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. Journal of Civil Engineering, 2005(7): 87-91.

(编辑 吴海西 沈 波)