

复合地基中散体材料桩荷载-沉降关系的数值分析

杨利群

(湖南伟大集团, 湖南 株洲 412000)

摘要: 针对散体材料桩与桩周土相互作用的特点, 基于弹性理论及计算假定, 利用应力函数法对复合地基中散体材料桩桩身的应力状态进行了分析, 推导出了考虑桩间土荷载 σ_s 及桩、土自重影响的散体材料桩的荷载-沉降关系式; 利用该方法对某工程实例进行了计算分析, 结果表明, 基于本文方法获得的散体材料桩的荷载-沉降关系与实测结果吻合较好。

关键词: 散体桩复合地基; 应力函数法; 荷载-沉降关系; 弹性理论

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)04-0014-03

Numerical Analysis on the Load-Settlement Relation of Gravel Column in Composite Foundation

Yang Liqun

(Hunan Mightier Group, Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: Considering the interaction characteristics between gravel column and soil surrounding pile, column stress state in the gravel composite was analyzed by the stress function method based on the elastic theory. Considering the influence of load among columns and deadweight of column and soil surrounding pile, the load-settlement relation was established. Finally, when the method was used to analyze the practical project, its feasibility was proved by the reasonable agreement between the calculated and the measured values.

Key words: composite foundation with gravel column; stress function method; load-settlement relation; elastic theory

散体桩主要是以碎石桩和砂桩为代表。20世纪50年代美国开始使用碎石桩处理粘土和砂土地基; 我国在1977年开始应用振冲碎石桩加固软土地基。目前, 用散体材料桩加固软土地基的理论和实验研究均取得了长足进展。就散体材料桩承载力计算方法而言, 它包括被动土压力法、圆孔扩张法及修正的被动土压力法^[1-4], 这些方法大都未考虑桩、土自重对散体材料桩承载力的影响。文献[5]在前人研究成果的基础上, 提出了近似考虑桩体和土体自重影响的被动土压力修正法, 但文中采用了桩间土荷载 $\sigma_s=0$ 的假定, 而散体材料桩复合地基中, 桩实际的受力状况并不是这样, 即桩间土承受的荷载 $\sigma_s \neq 0$; 文献[6]基于双剪统一强度

理论, 探讨了碎石桩与桩周土的径向相互作用; 文献[7]对加筋碎石桩复合地基的承载特性进行过探讨。

本文针对散体材料桩与桩周土相互作用的特点, 基于弹性理论及计算假定, 推导出了散体材料桩荷载-沉降关系公式。

1 基本假定及计算原理

1.1 基本假定

1) 散体材料桩-桩周土界面上的径向接触应力(以压应力为正)满足:

$$\sigma_r \Big|_{r=r_0} = k(\sigma_s + \gamma_s z), \quad (1)$$

收稿日期: 2008-06-20

作者简介: 杨利群(1967-), 女, 湖南株洲人, 湖南伟大集团工程师, 主要从事土木工程技术管理方面的工作。

式中: r_0 为桩半径;

σ_s 为桩周土表面应力;

γ_s 为桩周土重度;

k 为桩周土侧压力系数;

z 为计算点深度。

2) 散体材料桩-桩周土界面上的剪切力满足库伦公式, 其大小取桩端深度处桩-土界面土的抗剪强度的 1/2, 即:

$$\tau_{0z} = (c_0 + \sigma_0 \tan \delta) / 2, \quad (2)$$

式中: c_0 为桩-土界面处土的内聚力;

δ 为桩-土界面处土的内摩擦角;

σ_0 为桩端深度处桩-土界面土的径向应力,

$\sigma_0 = k(\sigma_s + \gamma_s L)$, L 为桩长。

3) 桩端阻力与桩端位移的关系采用如下模型^[8]:

$$\sigma_{pe} = k_b S_b, \quad (3)$$

式中: $k_b = \frac{4G_b}{\pi r_0^2 (1 - \mu_b) \eta}$, $\eta = 0.85 - 1.0$, $G_b = \frac{E_b}{2(1 + \mu_b)}$,

$E_b = E_s \frac{1 - 2\mu_b^2}{1 - \mu_b}$, E_b 、 E_s 分别为桩端土的变形模量

及压缩模量, μ_b 为桩端土的泊松比。

1.2 计算原理

根据前述的基本假定, 可抽象出散体桩和桩周土相互作用的力学模型如图 1 所示。

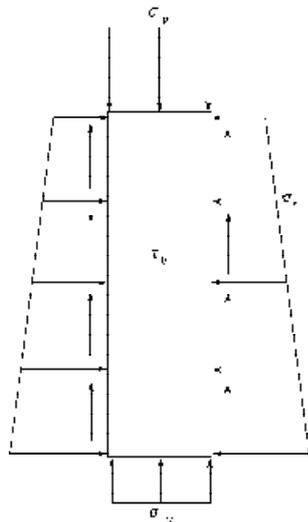


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

图 1 中坐标系为圆柱坐标系, σ_p 为桩顶应力, σ_{pe} 为桩端应力。很显然, 此问题为空间轴对称问题, 为探讨桩体中的应力状态, 构造如下所示的应力函数:

$$\varphi(r, z) = C_1 r^2 (r^2 - 4z^2) + C_2 z^2 (3r^2 - 2z^2) + C_3 r^2 z + C_4 z^3, \quad (4)$$

根据弹性理论^[9], 应力分量与应力函数的关系为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_r \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right); \\ \sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right); \\ \sigma_{rz} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \mu_r) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right]; \\ \tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \mu_r) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right]. \end{cases} \quad (5)$$

式中 μ 为桩体材料的泊松比。

通过验算, 式 (4)、(5) 能满足空间轴对称问题应力法的基本方程, 即

$$\begin{cases} \sigma_r|_{r=r_0} = k(\sigma_s + \gamma_s z); \\ \sigma_z|_{z=0} = \sigma_i; \\ \tau_{rz}|_{z=0} = \tau_0. \end{cases} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (5) 可得到桩体中应力分量的计算式为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_\theta = 16(1 - 2\mu_r)C_1 z - 12(1 + 2\mu_r)C_2 z + 2(2\mu_r - 1)C_3 + 16\mu_r C_4; \\ \sigma_z = -32(2 - \mu_r)C_1 z + 24\mu_r C_2 z + 4(2 - \mu_r)C_3 + 6(1 - \mu_r)C_4; \\ \tau_{rz} = 16(2 - \mu_r)C_1 r - 12\mu_r C_2 r. \end{cases} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 可得各待定系数:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{\mu_r k \gamma_s + \tau_0 (1 - 2\mu_r)}{32(1 + \mu_r) r_0}; \\ C_2 = \frac{4(2 - \mu_r)}{3\mu_r} C_1 + \frac{\tau_0}{12\mu_r r_0}; \\ C_3 = \frac{-k(1 - \mu_r)\sigma_s + \mu_r \sigma_{pe}}{2(1 + \mu_r)}; \\ C_4 = \frac{-2k(2 - \mu_r)\sigma_s + \mu_r(2\mu_r - 1)\sigma_{pe}}{6(1 + \mu_r)}. \end{cases} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7) 整理, 同时考虑散体材料桩自重的影响, 可得桩体中应力分量的计算式为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_\theta = Az + k\sigma_s; \\ \sigma_z = (B - \gamma_s)z + \sigma_i; \\ \tau_{rz} = Cr. \end{cases} \quad (9)$$

式中: γ_p 为桩体材料重度;

$$A = 16(1 - 2\mu_r)C_1 - 12(1 + 2\mu_r)C_2;$$

$$B = -32(2 - \mu_r)C_1 + 24\mu_r C_2;$$

$$C = 16(2 - \mu_r)C_1 - 12\mu_r C_2.$$

将式(9)代入广义虎克定律 $\epsilon_r = \frac{\sigma_r - \mu_r(\sigma_r + \sigma_\theta)}{E_r}$

中并积分,整理可得散体材料桩压缩量 w 与桩顶应力之间的关系:

$$w = \alpha \sigma_p + \beta, \quad (10)$$

式中: $\alpha = \frac{2k\mu_r L}{E_r}$; $\beta = \frac{(2A\mu_r - B - r_p)L^2}{2F_p}$; r_p 为散体材料桩的半径。

由式(9)中的第二式与式(3)联立可得桩端位移计算式:

$$s_b = \frac{1}{k_s} \sigma_p + \frac{B + \gamma_p}{k_b} L, \quad (11)$$

式中 γ_p 为桩体材料的平均重度。

将式(10)、(11)叠加,可得桩顶荷载-沉降关系为:

$$s = \left(\alpha + \frac{1}{k_s} \right) \sigma_p + \beta - \frac{(B + \gamma_p)L}{k_b}. \quad (12)$$

2 计算实例分析

现以某公路工程碎石桩复合地基工程现场静载试验为例^[10],采用本文方法与实验结果进行验证。碎石桩桩长为8.0 m,桩半径为0.4 m,置换率为0.224,取桩体材料重度及泊松比分别为19 kN/m³和0.25。利用42#桩的荷载-沉降曲线求得42#碎石桩的变形模量为21.5 MPa。根据该工程的地质勘察报告,天然地基的承载力特征值为78.5 kPa,土层内摩擦角、粘聚力的加权平均值约分别为13°和5.12 kPa,土的加权平均重度为18.3 kN/m³,桩端土的压缩模量为2.03 MPa,取桩端土的泊松比为0.35。根据该工程的设计建议,取桩土应力比为3.5。

图2为94#碎石桩的荷载-沉降关系的现场实验曲线和计算曲线。

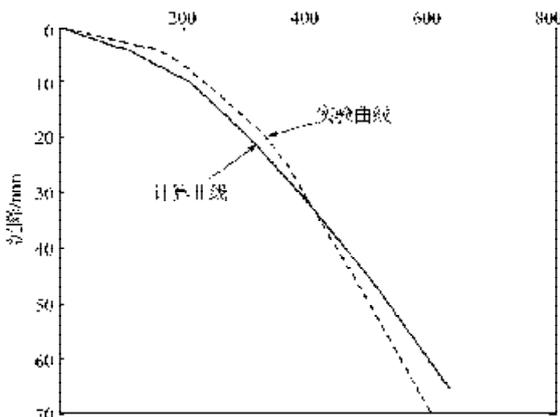


图2 荷载-沉降曲线

Fig. 2 Load-settlement curve

由图2可看出,碎石桩的荷载-沉降关系实验曲线和计算曲线很接近,表明本文计算方法是可行的。

3 结论

1) 本文基于弹性理论,并考虑桩-土间的横向相互作用,利用应力函数法对复合地基中散体材料桩桩身的应力状态进行了分析,推导出了考虑桩间土荷载 σ_s 及桩、土自重影响的散体材料桩荷载-沉降关系;

2) 本文方法既可以模拟刚性承台下的复合地基中散体材料桩的荷载-沉降关系,也可以对路堤荷载作用下的散体材料桩荷载-沉降关系进行预测;

3) 计算实例表明,本文计算结果与实测结果吻合较好,但其中某些参数的选取还需要大量的工程实例的验证。

参考文献:

- [1] Hughes J M O, Withers N J. Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns[J]. Ground Engineering, 1974, 7(3): 42-49.
- [2] Mitchell James K, Huber Timothy R. Performance of a Stone Column Foundation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 205-223.
- [3] Balaam N P, Booker J R. Effect of Stone Column Yield on Settlement of Rigid Foundations in Stabilized Clay[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985, 9(4): 331-351.
- [4] Datye K R. Settlement and Bearing Capacity of Foundation System with Stone Column[C]//Symposium on Developments in Ground Improvement Techniques. Bangkok: ASCE, 1982: 85-103.
- [5] 何广讷. 复合地基中散体材料桩极限承载力的计算[C]//第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 万国学术出版社, 1999: 467-473.
- [6] 刘杰, 赵明华. 基于双剪统一强度理论的碎石单桩复合地基性状研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 707-711.
- [7] Wood L A, Johnson D, Watts K S, et al. Performance of Strip Footings on Fill Materials Reinforced by Stone Columns[J]. Structure Engineering, 1996, 74(16): 265-271.
- [8] Poulos H G, Davis E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [9] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [10] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

(责任编辑: 张亦静)