

文章编号: 1000-7598-(2006)10-1719-04

路堤荷载下具盖板的浆固碎石桩桩土应力比研究

顾长存¹, 刘汉龙¹, 邢恩达², 陈永辉¹, 罗 戌³

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310008; 3. 福建省交通规划设计院, 福州 350004)

摘 要: 桩土应力比是反映复合地基工作状态的重要参数, 前人做了较多的理论工作, 但理论解通常是在桩顶铺设砂垫层情况下推出的。在路堤荷载下浆固碎石桩复合地基一般在桩顶设置盖板, 针对浆固碎石桩复合地基的特殊情况, 进行了理论模型简化, 并且运用极限平衡理论和弹性理论, 推导了设置盖板的浆固碎石桩复合地基在路堤荷载下桩土应力比公式, 并通过工程实测资料进行了验证, 其结果可为浆固碎石桩复合地基的优化设计提供参考。

关 键 词: 浆固碎石桩; 盖板; 极限平衡; 桩土应力比

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Research on pile-soil stress ratio of grouting gravel pile with capping plate under embankment load

GU Chang-cun¹, LIU Han-long¹, XING En-da², CHEN Yong-hui¹, LUO Xu³

(1. Institute of Geotechnical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydropower, Hangzhou 310008, China; 3. Fujian Communications Planning & Design Institute, Fuzhou 350004, China)

Abstract: The pile-soil stress ratio is an important parameter depicting the work state of composite foundation. Lots of theoretical researches were carried out in recent years; but they were usually deduced on the condition of laying sand cushion. Under the load from embankment, the capping plate is set at the top of grouting pile. Based on this especial condition, a proper theoretical model is brought forward. Furthermore, limit equilibrium theory and elastic theory are adopted to deduce the formula of pile-soil stress ratio of grouting gravel pile composite foundation under embankment load; and it is validated by project actual measurement and instruct the design of grouting gravel pile composite foundation.

Key words: grouting gravel pile; capping plate; limit equilibrium; pile-soil stress ratio

1 引 言

浆固碎石桩是一种引入注浆技术的新型复合地基处理方法^[1, 2], 已在杭-千(杭州至千岛湖)高速公路等工程中得到应用。浆固碎石桩成桩直径为 300~700 mm, 桩长一般在 35 m 以内, 它是利用钻机按设计直径钻进成孔, 孔内投填石料后进行注浆, 浆液与填料胶结成桩。浆液除在孔中注浆成桩外, 也向周围土体渗透。浆固碎石桩复合地基加固地基的机理是浆液除在孔内与骨料胶结成桩外, 还部分渗入桩周土体, 改善桩周天然土的性质。浆固碎石桩成桩后, 复合地基由桩体、浆液扩散区和天然土体三部分组成。为防止路堤下的浆固碎石桩复合地基桩体刺入路堤和提高浆固碎石桩桩体承担的

荷载, 一般在桩顶设置一定面积和厚度的现浇混凝土盖板。

桩土复合地基中设计的基本原则是使桩体和桩间土能最大限度地发挥作用, 而桩土应力比是反映复合地基工作状态的重要参数。如何修正刚性基础下的复合地基理论以适应路堤等柔性基础的情况, 已引起工程界和学术界的广泛关注^[3, 4]。沈才华^[5]分析了砂垫层的单元应力状态, 运用极限平衡破坏理论求解了桩土应力比的协调方程, 以此分析砂垫层的作用机理。本文考虑工程实际, 情况分别进行理论模型简化, 并运用极限平衡破坏理论和弹性理论, 推导了路堤极限平衡条件下浆固碎石桩的桩土应力比的理论公式, 最后用实例进行了验证。

收稿日期: 2005-01-05

修改稿收到日期: 2005-12-09

作者简介: 顾长存, 男, 1963 年生, 副教授, 主要从事软基处理研究。E-mail: changcungu@126.com

2 理论模型简化

根据浆固碎石桩受力条件和加固机理, 将计算模型进行概化: (1) 浆液在土层中均匀扩散, 渗透半径沿深度不变; (2) 桩体、浆液扩散区和天然土体为弹性体; (3) 浆液扩散区半径在盖板范围内。分析时, 首先将盖板及盖板下桩体、桩周土整体概化为复合桩体, 运用极限平衡破坏理论推导出在路堤荷载作用下盖板应力与盖板外桩周土的应力比。其次, 假设盖板为刚性圆形基础, 运用弹性理论求出盖板下桩体、浆液扩散区及天然土体的应力比, 推导出路堤荷载下设置盖板情况下浆固碎石桩复合地基的桩土应力比的协调方程。

3 路堤荷载下的桩土应力比

高速公路的路堤填土一般较高, 相对于刚性桩桩身面积, 可以视为半无限空间体。浆固碎石桩复合地基在桩顶设置一定面积和厚度的盖板, 可以将盖板及盖板下桩体、浆液扩散区、天然土体简化成具有一定弹性模量和泊松比的复合桩体, 复合地基单元受力见图 1, 其中盖板即复合桩体的半径 $r_0 = a$, 复合地基单元的半径 $r_0 = b$ 。

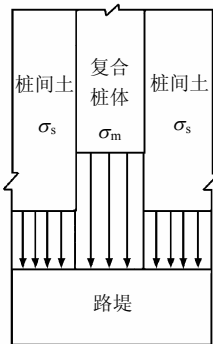


图 1 路堤反力示意图

Fig.1 Sketch of reversed stress of embankment

令复合桩体的桩土应力比为 $n' = \sigma_m / \sigma_s$, 其中桩顶应力为 σ_m , 盖板外桩间土应力为 σ_s 。根据作用力与反作用力原理, 把复合桩体受力和盖板外桩间土受力简化为荷载作用在路堤填土上, 如图 2 所示。假设此时路堤填土整体达到极限平衡状态, 取路堤填土单元进行分析, 由极限平衡理论^[6]可知:

$$\sigma_{lf} = \sigma_{3f} \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (1)$$

式中, σ_{lf} 、 σ_{3f} 为极限状态的大、小主应力; c 、 φ 为路堤填土的参数。一般路堤填土以碎石土为主, 黏聚力 $c = 0$, 则式(1)简化为作用在路堤上的反力为

均布圆形荷载, 可以将其简化为 σ_s 和 $\Delta\sigma = \sigma_m - \sigma_s$ 两次圆形均布荷载的叠加, 运用布希涅斯克解答可以求得均布荷载下路堤中某点的应力:

$$\sigma_{lf} = k \sigma_{3f} \quad (2)$$

式中, $k = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ 。

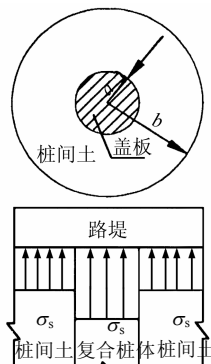


图 2 路堤受力示意图

Fig.2 Sketch of stress in embankment

由弹性力学^[7]可知, 在半空间体边界上受圆形均布荷载, 路堤中 Z 轴下方产生的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3z^3}{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{2\pi r dr dq}{(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} = q \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r_0^2)^{\frac{3}{2}}} \right]; \\ \sigma_r = \sigma_\theta &= -\frac{q}{2} \left[(1 + 2\mu) + \frac{z^3}{(z^2 + r_0^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{2(1 + \mu)z}{(z^2 + r_0^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

假设均布荷载 $\Delta\sigma$ 在 Z 轴下方产生的应力为 σ_{z1} 、 σ_{r1} , 均布荷载 σ_s 在 Z 轴下方产生的应力为 σ_{z2} 、 σ_{r2} , 由叠加原理可得填土路堤内 Z 轴下方产生的应力为 σ_r 、 σ_r , 即

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2}; \quad \sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得:

$$\sigma_z = \Delta\sigma \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \right] + \sigma_s \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\Delta\sigma}{2} \left[(1 + 2\mu) + \frac{z^3}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{2(1 + \mu)z}{(z^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} \right] + \\ &\quad \frac{\sigma_s}{2} \left[(1 + 2\mu) + \frac{z^3}{(z^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{2(1 + \mu)z}{(z^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

已知复合桩体与桩间土的桩土应力比 $n' = \sigma_m / \sigma_s$ 整理得:

$$n' = \frac{(\sigma_m - \sigma_s) + \sigma_s}{\sigma_s} = 1 + \frac{(\sigma_m - \sigma_s)}{\sigma_s} = 1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_s}$$

即

$$\Delta\sigma / \sigma_s = n' - 1 \quad (7)$$

圆形均布荷载作用对称, Z 轴下方单元体不受

剪力的作用, 当土体单元达到极限平衡状态时所求得的 σ_z 、 σ_r 即为大、小主应力, 即 $\sigma_z = \sigma_{1f}$, $\sigma_r = \sigma_{3f}$, 将式(5)~(7)代入式(2), 整理得:

$$n' - \frac{1}{2}k(n'-1)(1+2\mu) - \frac{1}{2}k(1+2\mu) = \left(1 + \frac{k}{2}\right)(n'-1) \frac{z^3}{(z^2+a^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{(1+k/2)z^3}{(z^2+b^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{(n'-1)kz(1+\mu)}{(z^2+a^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{kz(1+\mu)}{(z^2+b^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

此方程为复合桩体与盖板外桩间土应力比的协调方程, 反映了复合桩体与盖板外桩间土应力比值 n' 、路堤填土内摩擦角 φ 、黏聚力 c 、置换率 m 、泊松比 μ 和路堤填土高度的变化规律。为探讨浆固碎石桩桩土应力比的变化规律, 还需计算盖板下桩体和浆液扩散区的应力。

对盖板进行受力分析, 其受力状态如图 3 所示, 根据力的平衡原理, 有

$$\sigma_m A = \sigma_p A_p + \sigma_j A_j + \sigma_s' A_s \quad (9)$$

式中, σ_m 为盖板的应力, 即复合桩体的桩顶应力; σ_p 、 σ_j 、 σ_s' 分别为盖板下桩体, 浆液扩散区, 桩间土的平均应力; A 、 A_p 、 A_j 、 A_s 分别为盖板面积、盖板下桩体、浆液扩散区、桩间土的面积。

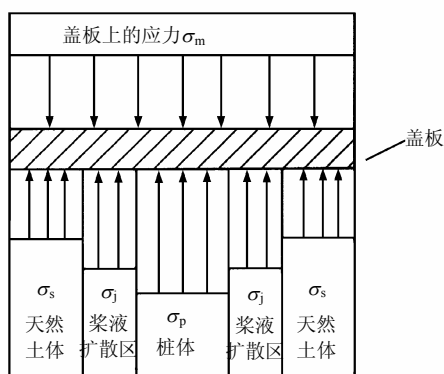


图 3 盖板受力示意图

Fig.3 Stress of capping plate

盖板为圆形刚性基础, 不同介质组成的复合地基中的基础应力除与介质弹性模量 E 值有关, 尚与介质所处的位置有关^[8]。根据平均刚性模量分配原理和圆形刚性基础应力分布的弹性理论^[9], 可以得出,

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_s} = \frac{E_p}{E_s} \frac{K_p}{K_s}; \quad \frac{\sigma_j}{\sigma_s} = \frac{E_j}{E_s} \frac{K_j}{K_s} \quad (10)$$

式中, E_p 、 E_j 、 E_s 分别为盖板下桩体、浆液扩散区、桩间土的弹性模量; K_p 、 K_j 、 K_s 为三者的刚性基础接触应力位置系数。

将式 (10) 代入式 (9), 整理可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s' &= \frac{\sigma_m A E_s K_s}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s}; \\ \sigma_p &= \frac{\sigma_m A E_p K_p}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s}; \\ \sigma_j &= \frac{\sigma_m A E_j K_j}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

令浆固碎石桩桩体应力与盖板外桩间土应力比值为 n_1 , 浆液扩散区应力与盖板外桩间土应力的比值为 n_2 , 即

$$n_1 = \sigma_p / \sigma_s; \quad n_2 = \sigma_j / \sigma_s \quad (12)$$

将式 (11) 代入式 (12), 整理得到 n_1 、 n_2 与 n' 的关系式:

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{\sigma_p}{\sigma_s} = \frac{A E_p K_p}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s} \frac{\sigma_m}{\sigma_s} = K_1 n'; \\ n_2 &= \frac{\sigma_j}{\sigma_s} = \frac{A E_j K_j}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s} \frac{\sigma_m}{\sigma_s} = K_2 n' \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{A E_p K_p}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s}; \\ K_2 &= \frac{A E_j K_j}{E_p K_p A_p + E_j K_j A_j + E_s K_s A_s} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式 (13) 分别代入式 (8), 可得到 n_1 、 n_2 的协调方程, 该方程反映了浆固碎石桩复合地基桩土应力比 n_1 、 n_2 , 置换率 m , 桩体、浆液扩散区和盖板外桩间土的弹性模量比 E_p/E_s 、 E_j/E_s , 路堤填土 φ 、 c 、 μ 和路堤填土高度的变化规律, 其中浆固碎石桩复合地基桩体与天然土体的应力比的协调方程为

$$K_1 n' - \frac{1}{2}k(K_1 n' - 1)(1+2\mu) - \frac{1}{2}k(1+2\mu) = (1+k/2)(K_1 n' - 1) \frac{z^3}{(z^2+a^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{(1+k/2)z^3}{(z^2+b^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{(K_1 n' - 1)kz(1+\mu)}{(z^2+a^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{kz(1+\mu)}{(z^2+b^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

同理, 可得浆液扩散区与天然土体的应力比的协调方程。

4 工程实例

杭-千高速公路 k2+784~k2+817 为高速公路通道采用浆固碎石桩复合地基处理, 处理段具体设计参数: 桩径为 500 mm, 混凝土强度等级为 C15,

邻近桩间距桥台为 3.0 m, 过渡段桩间距为 3.5 m。梅花型布置, 桩顶部设为 1 500 mm×1 500 mm, 厚 200 mm, 混凝土强度等级为 C25 的盖板, 计算取如下参数: 路堤填土 $c=50$ kPa, $\varphi=30^\circ$, 桩土置换率 $m_1=2.4\%$, 浆液扩散区置换率 $m_2=5.4\%$, 盖板置换率 $m_3=28.2\%$, $\mu=0.4$, $E_j/E_p=0.4$ 。将参数代入协调方程, 并将路堤填土高度转换为相应的荷载, 即可得 n_1 、 n_2 在路堤荷载下的变化曲线 (图 4)。图 5 为实测桩土应力比随时间变化曲线。考虑在现场监测数据采集的特点, 以时间为横坐标, 同时画出路堤填土高度随时间变化曲线来描述荷载的变化, 其中路堤填土高度可以转换为相应的荷载。对比图 4 和图 5 可以看出, 二者桩土应力比总的变化趋势相同, 都随荷载的增加而减小, 反映出桩土应力比变化的一般规律: 在加荷初期路堤荷载主要由桩体承担, 随着荷载的增加, 桩间土所分担的荷载逐渐增加, 尽管桩体的应力也在增加, 但桩所分担的荷载逐渐减小, 桩土应力比表现为逐渐减小的规律。

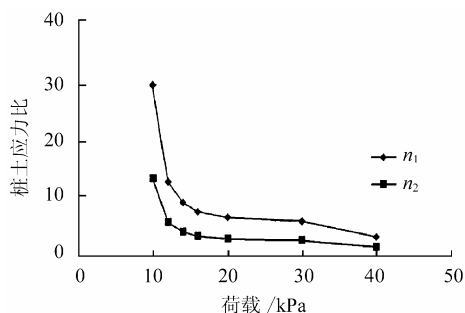


图 4 理论计算桩土应力比变化曲线

Fig.4 Curves of pile-soil stress ratio by calculation

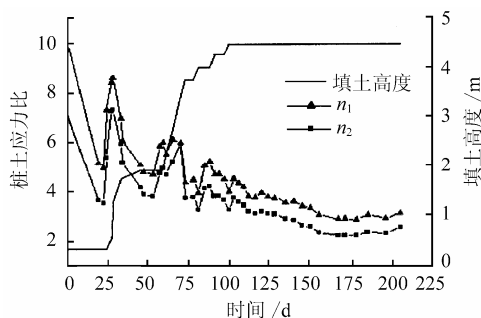


图 5 实测桩土应力比变化曲线

Fig.5 Curves of pile-soil stress ratio by actual measurement

5 结 论

(1) 根据杭-千高速公路在浆固碎石桩桩顶设置盖板的情况, 进行了模型概化, 运用极限破坏理论和弹性理论推导出浆固碎石桩复合地基的桩土应力比协调方程, 工程实践验证本文推导的公式正确。

(2) 由协调方程可知, 浆固碎石桩复合地基的桩土应力比随荷载的增加而呈减小趋势, 符合复合地基的作用机理。本文所推导的协调方程, 对于其他参数影响下进行桩土应力比变化规律的研究也适用。

(2) 浆固碎石桩复合地基不同于一般的刚性桩复合地基, 其加固区由桩体, 浆液扩散区和桩间土三部分组成。由协调方程可知, 三者的荷载分担比依次递减, 共同承担上部路堤荷载, 符合复合地基的作用机理。

参 考 文 献

- [1] 刘汉龙, 陈永辉, 宋法宝. 一种桩土互动浆固散体材料桩复合地基施工工法[P]. 中国专利: 200510038903X, 2005.
- [2] 刘汉龙. 浆固碎石桩技术及其应用[J]. 岩土工程界, 2006, (7): 27—30.
LIU Han-long. Grout-solidified CFG technology and its application[J]. *Geotechnical Engineering Field*, 2006, (7): 27—30.
- [3] 朱云升, 胡幼常, 丘作中, 等. 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): 395—400.
ZHU Yun-sheng, HU You-chang, QIU Zuo-zhong, et al. Finite element analysis of mechanical behaviors of flexible foundation and composite ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3): 395—400.
- [4] 朱世杰, 徐日庆, 杨晓军, 等. 带垫层刚性桩复合地基桩土应力比的计算与分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 814—817.
ZHU Shi-zhe, XU Ri-qing, YANG Xiao-jun, et al. Computation and analysis of ratio of pile stress to soil stress of rigid pile composite foundation with cushion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(4): 814—817.
- [5] 沈才华. 深层搅拌桩复合地基实用沉降计算方法研究及砂垫层作用机理理论分析[硕士论文 D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [6] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.
- [7] 陈国荣. 弹性力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2002.
- [8] 鞠建英. 特种结构地基基础工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] Selvadurai A P S. 土与基础相互作用的弹性分析[M]. 范文田等译, 北京: 中国铁道出版社, 1984.