

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3637-05

浆固碎石桩单桩荷载传递特性研究

温世清^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}, 陈育民^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘 要: 浆固碎石桩是加固软土地基的一种新型桩基技术, 已成功应用于高速公路和高速铁路等工程软土地基处理。为了研究浆固碎石桩单桩荷载传递机制, 假定浆固区压缩模量呈指数分布, 应用圆形承载板作用下的半空间体位移的解, 对竖向荷载作用下单桩复合地基各部分沉降进行分析, 推导出桩轴向压应力、桩侧摩阻力和桩顶沉降计算公式。现场试验实测结果与理论计算结果对比表明, 理论计算值与实测值相吻合, 验证了理论计算公式的合理性。

关 键 词: 浆固碎石桩; 荷载传递; 桩侧摩阻力; 沉降; 地基处理

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Analysis of load transfer characteristics of single grouted gravel pile

WEN Shi-qing^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}, CHEN Yu-min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Grouted gravel pile is a new technique of piles for reinforcing soft soils. It has been successfully used in construction of projects of expressway and high-speed railway. In order to study the load transfer mechanism of the pile, under the assumption that the compression modulus is obeyed the exponential distribution in reinforced zone, and based on the solution of settlement in half-space under circular bearing plate, the settlements of different parts of grouted gravel pile composite foundation under loads are analyzed; and the formulas of axial force, lateral friction resistance along the grouted gravel pile, and settlement on the top of pile are derived. The practicability of this method is illustrated by a case study. It is shown that the theoretical calculation results are close to the actual measurement results. Therefore the deduced equations are reasonable.

Key words: grouted gravel pile; load transfer; lateral friction resistance; settlement; soil improvement

1 引 言

分析桩的荷载传递机制, 了解其在荷载作用下桩侧摩阻力的分布规律对研究桩的加固性能非常重要, 很多学者都进行了这方面的研究^[1-2]。浆固碎石桩作为河海大学研制开发的一种新型桩基专利技术^[3-4], 其加固性能的好坏决定其能否在实际工程中得到推广应用, 研究其荷载传递机制很有必要。

在相同荷载作用下, 散体材料桩、柔性桩和刚性桩的荷载传递机制是不相同的^[5]。目前很多学者都采用荷载传递法和数值模拟等方法分析各类型桩的荷载传递机制。荷载传递法首先是由 Seed 和 Reese^[6]于 1957 年提出, 此后徐和^[7]、房卫民^[8]等许多国内外学者相继在此基础上有所发展, 但该方法

无法考虑到土体的连续性, 且计算较为复杂。本文将首先对浆固碎石桩复合地基在荷载作用下桩-土各部分沉降进行分析, 根据不同部分间的变形协调关系推导出桩侧摩阻力、轴向压应力和桩顶沉降的计算公式。最后通过与现场试验进行对比, 理论计算值与实测值相吻合, 验证本文计算方法的实用性。最后利用理论推导的公式, 对不同荷载作用下桩侧摩阻力和轴向压应力的分布特性进行了分析, 以便更好地为实际工程设计提供服务。

2 计算模型与沉降计算

浆固碎石桩在特殊工况下对传统碎石桩进行了改进, 以提高软土地基的承载力, 减小软土地基沉降, 满足工程需要。浆固碎石桩在成桩过程中, 一

收稿日期: 2011-07-11

基金项目: 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目 (No. BK2008040); 江苏省青蓝工程创新团队资助项目。

第一作者简介: 温世清, 男, 1975 年生, 博士研究生, 主要从事软土地基处理的理论和实践研究。E-mail: wenshiqhu@tom.com

方面通过注浆,水泥浆液胶结碎石骨料成强度较大的桩体;另一方面由于水泥浆液与土发生一系列化学反应以及水泥浆液由于压力的作用引起的渗透作用,使得桩周土得到了部分加固,这样在桩-土交界面形成物理力学性质得到改善的浆固区。通过注浆产生的浆固区,一方面可以提高桩侧土体的抗滑极限承载能力,另一方面也可以提高桩侧土体的压缩模量,减小桩体沉降。注浆压力随离桩体距离递增而呈递减趋势,使得浆固区沿桩体环形分布,径向方向上由内向外加固效果逐渐降低,桩周土压缩模量呈指数分布,如图1所示^[9]。

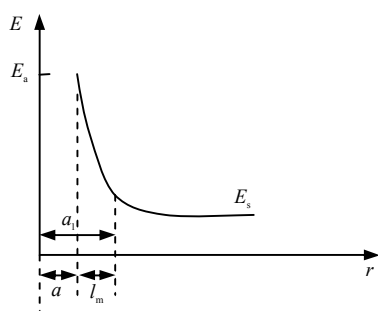


图1 浆固区压缩模量沿径向变化曲线

Fig.1 Variation curve of compression modulus in radial direction on grouted zones

图中 a 为桩体半径, E_a 为桩体弹性模量, E_s 为土体压缩模量, l_m 为浆固区半径。浆固碎石桩复合地基在成桩时深度越深,则水泥浆的压力越大,浆固区的半径越大。为了计算方便,假定由于水泥浆体渗透和对土体挤压的影响,桩-土脱离破坏面由半径为 a 的圆柱面增长至半径为 $a_1 = a + l_m$ 的圆柱面。当桩顶受荷载 F 作用时,桩体与桩周土体的受力情况如图2所示。

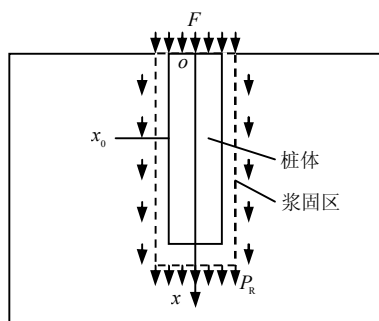


图2 复合地基受力简图

Fig.2 Diagram of forces in composite foundation

对图2进行分析可知,深度为 x_0 处桩侧土体的沉降由3部分组成:桩端反力 P_R 作用下在 x_0 点产生的沉降; x_0 点以下桩侧摩阻力传递给桩侧土体后,

在 x_0 点产生的沉降; x_0 点以上桩侧摩阻力传递给桩侧土体后,在 x_0 点产生的沉降。

而在深度为 x_0 处桩体的沉降也由3部分组成:桩端以下土体在桩端反力 P_R 作用下产生的沉降;桩侧摩阻力传递给桩侧土体后,在桩端产生的沉降; x_0 点以下浆固碎石桩在桩顶荷载 F 作用下桩体的压缩变形。

2.1 在 x_0 处桩间土体沉降计算

2.1.1 桩端反力 P_R 作用下在 x_0 点产生的沉降

桩端以下土体承受桩端反力而产生沉降的计算,可以按照刚性圆形承载板下半空间体位移的解进行^[10],在如图3所示的荷载作用下,在 x 轴上任意一点位移的解为

$$S_x = \frac{(1 + \mu_s) P a_1}{2 E_s} \left[2(1 - \mu_s) \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x}{a_1} \right) + \frac{x}{a_1} \frac{1}{1 + \frac{x^2}{a_1^2}} \right] \quad (1)$$

式中: P 为圆形承载板下边缘压应力值; μ_s 为土体泊松比。

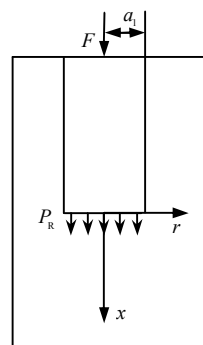


图3 圆形承载板作用下荷载作用简图

Fig.3 Load diagram under circular board

图中 a_1 为承载板的半径,由文献[10]中刚性承载板下压应力的分布计算公式,可得

$$P = \frac{2 P_R}{\pi a_1^2} \quad (2)$$

根据位移互等原理,桩端反力作用下深度为 x_0 处土体产生的沉降 S_{x_0R} 为

$$S_{x_0R} = \frac{\beta_R (1 + \mu_s) P_R}{\pi E_s a_1} \left[2(1 - \mu_s) + \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{l - x_0}{a_1} \right) + \frac{l - x_0}{a_1} \frac{1}{1 + \frac{(l - x_0)^2}{a_1^2}} \right] \quad (3)$$

式中: l 为浆固碎石桩桩长; β_R 为沉降折减系数, 由桩间土体的物理力学性质、桩体长度和半径等参量决定, 一般取值在 0.5~1.0 之间。

2.1.2 x_0 点以下桩侧摩阻力传递给桩侧土体在 x_0 处产生的沉降

取浆固碎石桩加固软土地基的任一截面进行分析, 按照圆形承载板作用下的半空间体位移的解, 对桩侧摩阻力可以按照如图 4 所示进行等效转化。

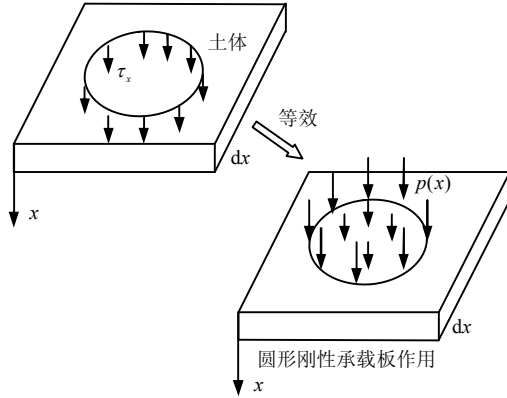


图 4 桩侧摩阻力等效转化

Fig.4 Sketch of the equivalent of lateral friction resistance

按照两种荷载作用下土体沉降相等的原则进行如下转化:

$$\int_0^{2\pi} 2(1-\mu_s) \frac{(1+\mu_s)\tau_x}{2\pi E_s a} a dx d\theta = \frac{2Pa(1-\mu_s^2)}{E_s} \quad (4)$$

式中: τ_x 为桩侧摩阻力, 则 P 为

$$P = \frac{\tau_x}{a_1} dx \quad (5)$$

则在 x_0 点以下桩体传递给桩侧土体的摩阻力在 x_0 处产生的沉降 S_{tu} 为

$$S_{tu} = \int_{x_0}^l \frac{\beta_R \tau_x (1+\mu_s)}{2E_s} \left[2(1-\mu_s) \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x-x_0}{a_1} \right) + \frac{x-x_0}{a_1} \frac{1}{1 + \frac{(x-x_0)^2}{a_1^2}} \right] dx \quad (6)$$

2.1.3 x_0 点以上桩侧摩阻力传递给桩侧土体后在 x_0 处产生的沉降

根据如图 4 所示的应力转换原理和式(1)可知, 在 x_0 点以上桩侧摩阻力传递给桩侧土体后在 x_0 处产生的沉降 S_{tp} 为

$$S_{tp} = \int_0^{x_0} \frac{\beta_R (1+\mu)\tau_x}{2E_s} \left[2(1-\mu_s) \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x_0-x}{a_1} \right) + \frac{x_0-x}{a_1} \frac{1}{1 + \frac{(x_0-x)^2}{a_1^2}} \right] dx \quad (7)$$

2.2 浆固碎石桩桩体沉降计算

2.2.1 桩端以下土体在桩端反力作用下产生的沉降

由式(1)可知, 桩端以下土体在桩端反力作用下产生的沉降 S_{Pr} 为

$$S_{Pr} = \frac{\zeta_R P_R (1-\mu_s^2)}{a_1 E_s} \quad (8)$$

式中: ζ_R 为桩端反力沉降系数, 由桩端以下软土体的物理力学性质和桩体长度等参量决定, 一般取值在 0.5~1.0 之间。

2.2.2 桩侧摩阻力在桩端处产生的沉降

桩侧摩阻力在桩底产生的沉降 S_{x_0p} 为

$$S_{x_0p} = \int_0^l \frac{\zeta_R (1+\mu)\tau_x}{2E_s} \left[2(1-\mu_s) \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{l-x}{a_1} \right) + \frac{l-x}{a_1} \frac{1}{1 + \frac{(l-x)^2}{a_1^2}} \right] dx \quad (9)$$

2.2.3 在 x_0 点以下浆固碎石桩桩体的压缩变形

根据三向虎克定律, 沿桩身方向的应变为

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_a} [\sigma_x - \mu_a (\sigma_\theta + \sigma_r)] \quad (10)$$

式中: ε_z 为桩身的轴向应变; σ_r 、 σ_θ 分别为径向和切向应力; μ_a 为桩体泊松比; 假定桩身截面上的正应力为均匀分布, 则有: $\sigma_\theta = \sigma_r = \sigma$ [11]。

根据库仑定律, 有

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (11)$$

式中: φ 为内摩擦角。

综上所述, x_0 处以下浆固碎石桩桩体的压缩变形 S_{x_0l} 为

$$S_{x_0l} = \int_{x_0}^l \frac{1}{E_a} \left(\sigma_x - 2\mu_a \frac{\tau_x}{\tan \varphi} \right) dx \quad (12)$$

式中: σ_x 为轴向压应力。

3 桩侧摩阻力分布方程求解

当桩-土发生脱离破坏之前, 深度为 x_0 处桩体和

同一深度处桩侧土体的沉降相等, 则

$$S_{x_0R} + S_{\tau\mu} + S_{\tau p} = S_{P_R} + S_{x_0p} + S_{x_0l} \quad (13)$$

式中各参量的计算公式依次如式(3)、(6)~(9)、式(12)所示。

在浆固碎石桩深度为 x_0 处取某一微段进行分析, 如图5所示。

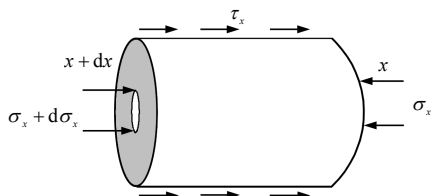


图5 受力简图
Fig.5 Sketch of the forces

其平衡方程为

$$(\sigma_{x_0} + d\sigma_{x_0})\pi a_1^2 + 2\tau_{x_0}\pi a_1 dx = \sigma_{x_0}\pi a_1^2 \quad (14)$$

根据受力平衡不难得到:

$$a_1 d\sigma_{x_0} + 2\tau_{x_0} dx = 0 \quad (15)$$

当 $x=0$ 时, 也就是在浆固碎石桩表面, 轴向压应力 σ_x 为

$$\sigma_x = \frac{F}{I} = \frac{F}{\pi a_1^2} \quad (16)$$

式中: I 为浆固碎石桩截面面积。

当 $x=l$ 时, 也就是在浆固碎石桩的底端, 桩所受的轴向压应力 σ_x 为

$$\sigma_x = \frac{P_R}{\pi a_1^2} \quad (17)$$

联立式(13)、(15), 根据边界条件式(16)、(17)可得

$$\sigma_x = \frac{F}{\pi a_1^2} \left\{ \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Ax+B}{B} \right) - \frac{x}{A} \right] + \frac{\beta_R}{\xi_R} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{A(l-x+a_1)+B}{B} \right) - \frac{l-x+a_1}{A} \right] \right\} \quad (18)$$

$$\tau_x = \frac{F}{2\pi a_1} \left[\exp \left(\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Ax+B}{B} \right) - \frac{x}{A} \right) \left(\frac{x}{Ax+B} \right) + \frac{\beta_R}{\xi_R} \exp \left(\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{A(l-x+a_1)+B}{B} \right) - \frac{l-x+a_1}{A} \right) \cdot \left(\frac{l-x+a_1}{A(l-x+a_1)+B} \right) \right] \quad (19)$$

$$P_R = F \frac{\beta_R}{\xi_R} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Aa_1+B}{B} \right) - \frac{a_1}{A} \right] \quad (20)$$

式中:

$$A = \frac{\mu_a a_1}{\tan \varphi}, B = \frac{3\pi E_a a_1^2 (1 - \mu_s^2)}{16 E_s} \quad (21)$$

4 试验验证

宁波绕城高速公路西段沿途软土层厚度大, 且具有含水率大、有机质含量高、抗剪强度低、高压缩性等不良特性。根据论证, 软土地基采用浆固碎石桩进行处理。综合考虑试验现场软土体力学特性, 取 $\beta_R = 0.7$, $\xi_R = 0.6$ 。浆固碎石桩设计桩身强度等级为 C10, 桩长为 28 m, 桩径为 0.6 m, 桩的设计极限承载力为 550 kN。根据文献[11], 考虑注浆渗透影响后, 桩等效半径 $a_1 = 0.309$ m。试验现场软土体物理力学性质和现场情况分别如表1和图6所示。

表1 软土层物理力学参数

层号	层厚 / m	含水率 / %	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	压缩模量 / MPa
②1	1.5	37.9	22.4	24.7	3.39
③1	6.9	52.0	18.0	24.0	1.87
③2	19.1	47.4	15.0	19.6	2.17
⑤1	2.4	28.1	19.5	38.0	5.57



图6 静荷载试验

Fig.6 Tests under static loads

通过本文理论计算与通过现场试验实测荷载-沉降曲线的对比见图7。

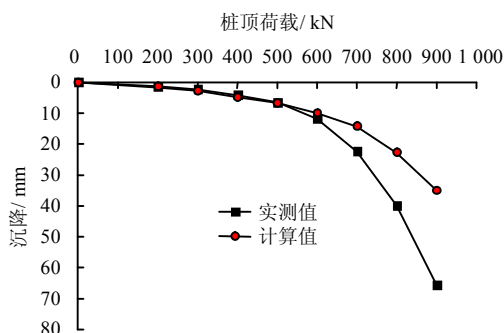


图7 桩顶荷载-沉降关系曲线

Fig.7 Curves of load vs. settlement on the top of pile

通过本文理论计算得到的各级荷载下轴向压应力随深度分布与现场试验实测对比情况见图 8。

通过本文理论计算得出的各级荷载下桩侧摩阻力随深度分布曲线如图 9。

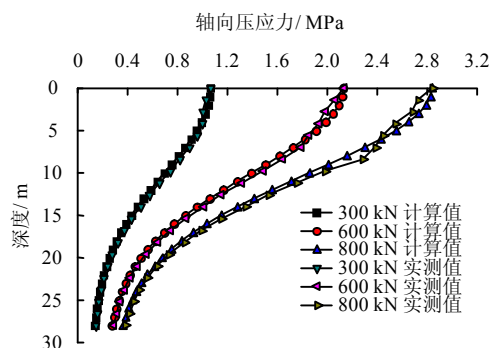


图8 各级荷载下轴向压应力随深度分布曲线
Fig.8 Variation curves of axial force along pile shaft under different load levels

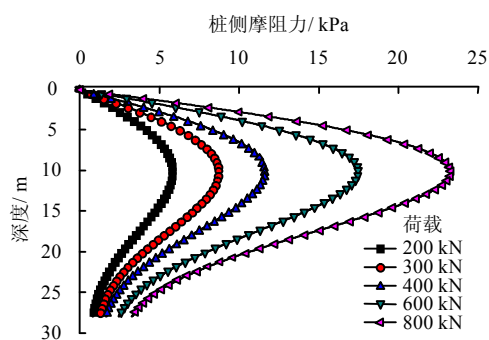


图9 各级荷载下桩侧摩阻力随深度分布曲线
Fig.9 Distribution curves of lateral friction resistance along pile under different load levels

分析图 7 可知, 桩顶荷载小于 600 kN 时计算得出的桩顶荷载-沉降曲线与现场实测结果基本吻合, 当桩顶荷载大于 600 kN 后复合地基濒临破坏, 计算值与实测值之间的误差逐渐变大。

从图 8 可以看出, 在各级荷载下轴向压应力理论计算值与实测值基本吻合, 轴向压应力随荷载的增加而逐渐变大。从桩顶至桩端轴向压应力经历了一个由最大值逐渐衰减的过程, 衰减速率经历了一个逐渐增加至极限后又逐渐减小的过程, 其决定于桩侧摩阻力分布情况。

从图 9 可以看出, 浆固碎石桩能全长发挥桩侧摩阻力, 但桩侧摩阻力并非均匀分布, 从桩顶至桩底经历了一个由 0 增长至最大值后又逐渐减小的过程。

5 结 论

(1) 假定浆固区压缩模量呈指数分布, 应用圆

形承载板作用下的半空间体位移解对复合地基桩-土各部分沉降进行了分析, 根据桩-土变形协调关系推导出了轴向压应力、桩侧摩阻力的一种计算方法。

(2) 理论计算结果与现场试验进行对比, 结果表明: 桩顶荷载较小时, 理论计算与实测值吻合较好; 当桩顶荷载较大、桩体濒临破坏时, 塑性区范围越来越广, 计算值与试验值差别较大。

(3) 运用本文的计算方法, 通过对各级荷载下桩侧摩阻力和轴向压应力随深度的分布规律进行分析, 得到了桩顶沉降随荷载的变化曲线, 为浆固碎石桩实际工程设计提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 律文田, 王永和, 冷伍明. PHC 管桩荷载传递的试验研究和数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 466—470.
LÜ Wen-tian, WANG Yong-he, LENG Wu-ming. Testing and numerical analysis of load transfer mechanism of PHC pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 466—470.
- [2] 钟闻华, 石名磊, 刘松玉. 超长桩荷载传递性状研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 307—311.
ZHONG Wen-hua, SHI Ming-lei, LIU Song-yu. Load transfer performance of over length piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 307—311.
- [3] 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: 中国, ZL200510038903X[P]. 2007-12-19.
- [4] 刘汉龙. 浆固碎石桩技术及其应用[J]. 岩土工程界, 2006, 9(7): 27—30.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. *Transactions, ASCE*, 1957, 122: 731—754.
- [7] 刘金砺. 桩基工程设计与施工技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1994.
- [8] 房卫民, 赵明华, 苏检来. 由沉降量控制桩竖向极限承载力的分析[J]. 中南公路工程, 1999, 24(2): 23—25.
- [9] 左威龙. 浆固碎石桩承载性状试验研究与分析[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [10] 朱照宏, 王秉纲, 郭大智. 路面力学计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1985.
- [11] 左威龙, 刘汉龙, 陈永辉. 浆固碎石桩成桩注浆影响范围现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3329—3333.
ZUO Wei-long, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Field testing analysis of grouting impact range of grouting gravel pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3329—3333.