

## 基于厚壁圆筒模型的筋箍碎石桩沉降计算

赵明华<sup>†</sup>, 马思齐, 肖尧, 杨超炜

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为解决现有方法难以考虑加筋材料实际受力状态而低估筋箍碎石桩复合地基沉降的问题,假设桩土等应变且均为线弹性材料,选取单桩有效加固单元整体作为分析对象,其中碎石桩同时受到加筋材料和土环的约束作用,而土环则可以考虑为同时受到单桩有效加固范围外土体的静止土压力和内部碎石桩鼓胀压力共同作用的厚壁圆筒,再结合广义胡克定律得到应力应变关系,进而导出了筋箍碎石桩复合地基沉降计算的新方法.采用工程实例验证并与已有方法进行比较,同时分析了外荷载水平、置换率对复合地基总沉降和桩土应力比的影响.与已有方法相比,该方法可以使上部荷载和筋箍碎石桩侧向受力变形联动进而调整加筋材料内力,从而更符合筋箍碎石桩实际受力变形情况,计算值与实测值相对误差为+5.70%,与现有保守计算方法相比误差最小.参数分析表明:置换率对于控制复合地基总沉降具有重要作用,外荷载一定时复合地基总沉降与桩土应力比均随着置换率提高而减小.

**关键词:**复合地基;筋箍碎石桩;径向位移;沉降

**中图分类号:**TU443

**文献标志码:**A

## Settlement Calculation of Geogrid-encased Stone Columns Based on Thick-walled Cylinder Model

ZHAO Minghua<sup>†</sup>, MA Siqi, XIAO Yao, YANG Chaowei

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The existing method is difficult to consider the actual state of geogrid ribs under loading, which could underestimate the settlement of the geogrid-encased stone column (GESC) composite foundation. In order to solve this problem, in this paper, the unit cell concept was employed as the objects in the analysis, while it was assumed that GESC together with soil was elastic materials and evenly deformed. Stone column was constrained by geogrid and earth ring at the same time, while the earth ring can be considered as a ring with earth pressure at rest provided by soil outside and bulging pressure caused by the stone column installed inside. Hook's law was then introduced to gain the stress-strain formula of the unit cell. Then, a different method of settlement calculation of GESC composite foundation was established. The rationality of the results of this method was verified by an engineering example and also compared with the existing method. The result demonstrates that the method agrees well with the engineering example. Through the comparison with the existing method, it is found that the relative error between the calculated

\* 收稿日期:2018-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478178), National Natural Science Foundation of China(51478178)

作者简介:赵明华(1956—),男,湖南邵阳洞口人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: mhzhaohd@21cn.com

value and measured value is +5.70%, which demonstrates the method presented in this paper is safer and more accurate as a result of the combined top loading and lateral deformation of GESC. The parametric study shows that the replacement ratio has a significant influence on the controlling settlement of composite foundation, and the increase of the replacement ratio can effectively reduce the pile – soil ratio and settlement of composite foundation when a certain level load is applied.

**Key words:** composite foundation; geogrid-encased column; radial displacement; settlement

作为取材便利、造价经济且工程性能良好的软土地基处理方式,碎石桩在道路工程上得到了大量应用.然而碎石桩复合地基存在易发生鼓胀破坏的缺陷,使得承载力提升和沉降控制均受到原有软土基础的极大制约.在该背景下,筋箍碎石桩应运而生,有效解决了碎石桩的鼓胀破坏问题<sup>[1-2]</sup>,因此筋箍碎石桩复合地基的承载力和沉降计算方法也成为关注重点.其中,找到有效的沉降计算方法,是使筋箍碎石桩复合地基更加适用于工程实际的关键.

目前对于普通碎石桩复合地基的沉降计算,得到广泛应用的有等效模量法、应力修正法和桩身压缩量法<sup>[3-4]</sup>.然而筋箍碎石桩的筋箍段不再完全呈现散体材料桩的性质,相较而言其受力机理更为复杂,散体材料桩的沉降计算方法不再适用,一些学者便开始寻求适用于计算筋箍碎石桩沉降的方法,在试验、数值模拟和理论计算方面均做出了研究和探讨.在试验方面,Afshar等<sup>[5]</sup>对碎石桩分别做了竖向和侧向加筋试验,发现增加筋材量总能提高复合地基承载力,并且在所有的试验组中,筋箍碎石桩的鼓胀破坏是主要破坏形式,起着决定承载力大小的作用;Gu等<sup>[6]</sup>依托大比例室内试验,研究了荷载增长对筋箍碎石桩桩土应力比的影响,发现筋箍套筒的存在能有效减少碎石桩体鼓胀破坏的产生,从而达到控制复合地基沉降的目的;Almeida等<sup>[7]</sup>进行足尺试验,结果表明箍筋的存在对于减小碎石桩径向变形进而减小复合地基沉降有很大贡献;Hong等<sup>[8]</sup>通过缩尺砂桩试验,发现筋箍套筒的存在不仅能够明显减少径向应变并且加筋材料在破坏后仍能对复合地基承载力提供一定贡献.

数值分析最大程度上还原了工程实际中筋箍碎石桩复合地基的受力状态和变形过程,是计算筋箍碎石桩复合地基沉降的有效方法<sup>[9-10]</sup>.在数值模拟方面,Yoo<sup>[11]</sup>通过数值建模分析认为碎石桩的有效加固深度只存在于加固区软土深度大于10 m的时候,而在其他情况下,为了使沉降量最小,有必要对碎

石桩进行通长加筋;Khabbazian等<sup>[12]</sup>应用有效加固单元概念,建立了3种不同数值分析模型,发现筋箍碎石桩三维全桩模型能更准确地反应其受力过程中土工格栅内部产生的拉应力,同时结果显示格栅纵横两方向的拉力并不相等;Hosseinpour等<sup>[13]</sup>基于有效加固单元建立了二维有限元分析模型,分析认为能提供径向约束的土工合成材料对碎石桩的承载力提高和地基沉降量的减少的作用更明显,并且径向约束之间存在最优间距.数值模拟中的模型建立和参数选取极为复杂,需要扎实的理论基础和实际经验,且计算过程费时费力,不具备易得性和普适性,而理论计算法则更具可操作性.在理论计算方面,曹文贵等<sup>[14-16]</sup>将筋箍碎石桩划分为筋箍段、非筋箍段和下卧层三部分,在筋箍段考虑桩土间的相对滑移,在非筋箍段考虑桩土的鼓胀变形,分别建立了不同的沉降计算式,取得了较好的成果;另外,曹文贵等<sup>[17]</sup>利用孔隙介质分析方法,建立了散体材料复合地基的孔隙介质力学模型,并引入分级加载思想计算复合地基总沉降,具有很好的精度;Zhang等<sup>[18]</sup>基于弹性理论和有效加固单元概念,忽略圆周方向接触面上的摩擦力,并将桩周土提供的侧向限制近似取为被动土压力而推导出了一种计算筋箍碎石桩复合地基沉降变形的计算方法;张玲等<sup>[19]</sup>基于荷载传递,并综合考虑了散体材料竖向及侧向变形的特性,得到了计算散体材料桩复合地基沉降的一种新方法.

本文对筋箍碎石桩沉降进行更进一步探讨,旨在理论计算方面提供一些新思路.鉴于Alamgir等<sup>[20]</sup>创新性地提出了“有效加固单元”这一概念,本文即以此为依托,主要分析了筋箍碎石桩复合地基的沉降.基于合理的前提假设,主要运用厚壁圆筒模型考虑单元体中裹敷筋箍碎石桩的土体受力状态,从而进一步分析筋材的实际受力状态,在考虑桩、土实际分担的荷载后,提出了基于厚壁圆筒模型的筋箍碎石桩沉降计算新方法.

## 1 计算模型与基本假定

筋箍碎石桩的沉降由桩体加固区沉降和下卧层沉降两部分组成:

$$w_s = w_{s1} + w_{s2} \quad (1)$$

式中:  $w_s$  为复合地基总沉降;  $w_{s1}$  为加固区沉降;  $w_{s2}$  为下卧层沉降.

下卧层沉降目前已有较好的计算方法,关键在于桩体加固区的沉降<sup>[21-22]</sup>,其中加固区的沉降又以桩体的沉降计算最为复杂,下面将重点对加固区桩体的沉降进行分析和探讨.

### 1.1 基本假定

碎石桩复合地基多以群桩形式出现,桩、土和垫层形成一个整体来承受上部荷载,在桩、土的相互作用下,其受力情况较为复杂.为简化分析,现取筋箍碎石桩复合地基中的单根桩加固区域作为分析单元,如图 1 所示.

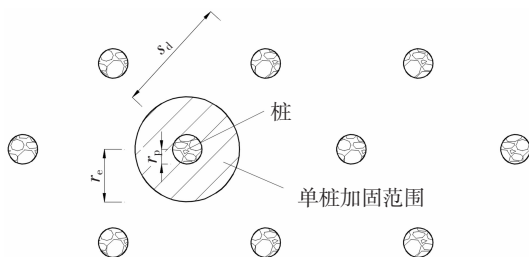


图 1 分析单元示意图  
Fig.1 Schematic diagram of analysis unit

图 1 中:  $r_p$  为桩体半径;  $r_e$  为桩体影响半径 (即分析单元半径);  $s_d$  为桩中心距.

根据布桩方式的不同,分析单元半径可以由单桩加固范围直径公式得到:

$$d_e = \begin{cases} 1.13s_d, & \text{正方形布桩} \\ 1.05s_d, & \text{梅花形布桩} \end{cases} \quad (2)$$

$$r_e = \frac{1}{2}d_e \quad (3)$$

式中:  $d_e$  为单桩加固范围直径;  $s_d$  为桩间中心距.

对于复合地基而言,刚性桩和柔性桩在桩土界面上均会产生相对位移.在理论分析中,由于桩土界面处的互锁作用,可假设桩土在界面处完全粘结<sup>[23]</sup>,且目前在实验与数值模型分析的文献中,也多见刚性板加载测试<sup>[24-25]</sup>,忽略桩土界面相对滑动也可以达到较好的精度.故为了简化计算,本文计算复合地基最终沉降过程中亦忽略桩侧摩阻力的影响.在计

算复合地基沉降时,一般认为桩体所受荷载在承载范围内,未达到极限状态,可在计算中只考虑桩土的弹性变形.为简化计算,根据图 1 所示分析单元,作如下假定:

1) 单元体之间相互不影响,即忽略群桩效应对单元体受力特性的影响;

2) 筋箍碎石桩与桩间土变形相同,桩土界面不产生摩阻力,即桩土等应变;

3) 碎石桩体和桩间土为弹性体,沉降过程中只产生弹性变形.

### 1.2 桩单元应力、应变分析

在桩土弹性变形阶段,已知单元体的应力状态,便可求解出单元体应变.因此在求解桩体沉降时,可从桩体的受力情况入手,将桩体沿深度方向等分为  $N$  段微单元,求解出每段微单元的沉降后再进行叠加,便可得到桩体总沉降.

首先将桩体等分成  $N$  段:

$$l = \frac{L_p}{N} \quad (4)$$

式中:  $L_p$  为分析单元桩长;  $l$  为微单元长度.

如图 2 所示,取第  $i$  段桩身微单元进行分析,并用微单元上表面的应力来计算其变形.

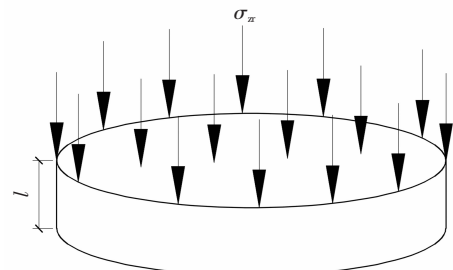


图 2 桩体微单元变形计算示意图  
Fig.2 Micro unit diagram of column

## 2 基于厚壁圆筒模型的沉降计算方法

通过对微单元的应力应变分析可知,求解桩单元的沉降关键在于求解桩体的应力状态.接下来即从桩单元轴力和所受围限力两方面进行分析.

### 2.1 桩单元轴力

根据假定 2),在不考虑桩土界面摩阻力的情况下,并忽略桩身荷载传递损失部分,桩身微单元上表面的竖向应力只由桩顶荷载和桩体自重两部分组成,其表达式为:

$$\sigma_{pz,i} = \gamma_p \cdot (i - 1)l + P_p \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{pz,i}$  为桩身第  $i$  段微单元上表面竖向应力;  $P_p$

为桩顶荷载;  $\gamma_p$  为碎石桩重度。

### 2.2 桩单元围限力

对于箍筋碎石桩加筋部分, 桩体所受围限力由土体和箍筋套筒两方面提供, 即

$$\sigma_{pr,i} = \sigma_{sr,i} + \sigma_{gr,i} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{sr,i}$  为土体围限力;  $\sigma_{gr,i}$  为筋材围限力。

对于非加箍段, 令式(6)中箍筋套筒提供的围限力  $\sigma_{gr,i}$  为零, 则桩体所受围限力只由土体  $\sigma_{sr,i}$  提供, 即

$$\sigma_{pr,i} = \sigma_{sr,i} \quad (7)$$

接下来分别对土体围限力和筋材围限力进行求解。

#### 2.2.1 土体围限力

如图 2 所示桩体微单元, 桩周土体受到桩体鼓胀产生的压力时, 可将其受力变形过程视为厚壁圆筒模型内壁受力变形过程, 土体在桩土界面处受到桩体扩张压力作用。取微单元上表面所在平面进行分析, 根据假定 3), 当土体尚处于弹性变形阶段时, 利用弹性力学的厚壁圆筒公式<sup>[26]</sup>来描述其位移场为:

$$u_{r,i} = \frac{r}{E_s} (1 - \nu_s) \frac{r_p^2 \sigma_{sr,i} - r_e^2 \sigma_{r0,i}}{r_e^2 - r_p^2} - \frac{1}{r E_s} (1 + \nu_s) \frac{r_e^2 r_p^2 (\sigma_{r0,i} - \sigma_{sr,i})}{r_e^2 - r_p^2} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_{r0,i}$  为半径  $r_e$  处土体径向应力;  $u_{r,i}$  为任意半径  $r$  处位移;  $\nu_s$  为桩周土泊松比;  $E_s$  为桩周土弹性模量。

在该平面上, 可合理假设单根桩影响半径  $r_e$  处的侧向土压力为静止土压力, 土环内部压力与土体对碎石桩围限力数值上相等, 如图 3 所示。

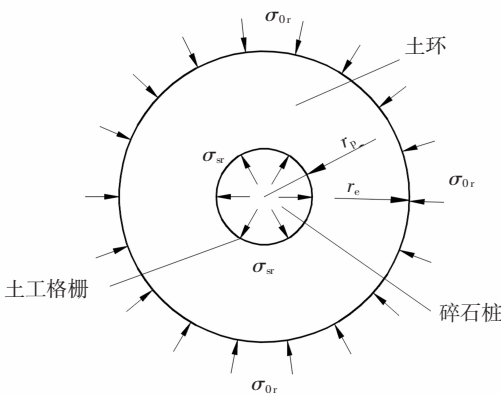


图 3 厚壁圆筒模型应用示意图  
Fig.3 Thick-walled cylinder model

即得到边界条件:

$$\sigma_{sr,i} = \gamma_s \cdot (i - 1) l + P_s \quad (9)$$

$$\sigma_{r0,i} = K_{0,s} \sigma_{sr,i} \quad (10)$$

$$P_s = \frac{P_v}{n} \quad (11)$$

式中:  $\sigma_{sr,i}$  为土体微单元上表面竖向应力;  $K_{0,s}$  为桩间土体静止土压力系数, 完全弹性条件下,  $K_{0,s} = \nu_s / (1 - \nu_s)$ ;  $\gamma_s$  为桩周土体重度;  $P_s$  为桩间土体上部荷载;  $n$  为桩土应力比;  $P_v$  为桩体上部荷载。

同时, 对于桩土界面处有:

$$\varepsilon_{pr,i} = -\frac{u_{pr,i}}{r_p} \quad (12)$$

式中:  $u_{pr,i}$  为半径  $r_p$  处位移。

令式(8)中变量  $r$  为  $r_p$ , 并把式(10)(12)代入式(8), 为使公式更加简化, 令  $t = r_e^2 / r_p^2$ , 即可解得土体所提供的围限力为:

$$\sigma_{sr,i} = \frac{2t \nu_s [\gamma_s \cdot (i - 1) l + P_s] + E_s \varepsilon_{pr,i} (t - 1) (1 - \nu_s)}{(1 - \nu_s) [\nu_s (t - 1) + t + 1]} \quad (13)$$

#### 2.2.2 筋材围限力

当鼓胀变形发生时, 筋材与桩、土发生协调变形, 其受力示意图如图 4 所示。

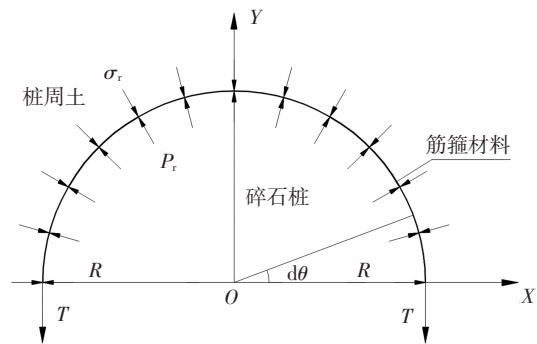


图 4 筋箍材料受力示意图  
Fig.4 Reinforced material force diagram

从图 4 中可知, 将桩周土体围限力  $\sigma_{sr,i}$  和碎石桩鼓胀压力  $\sigma_{pr,i}$  沿着  $Y$  轴积分, 引入筋材拉力  $T_g$ , 可由受力平衡得到:

$$\sigma_{pr,i} = \sigma_{sr,i} + \frac{T_g}{r_p} \quad (14)$$

其中, 筋材拉力  $T_g$  的计算式为:

$$T_g = J_g \varepsilon_{pr,i} \quad (15)$$

式中:  $J_g$  为筋材抗拉刚度, 单位为 kN/m。

由式(14)、式(15)结合式(6)可得:

$$\sigma_{gr,i} = \frac{T_g}{r_p} = \frac{J_g \varepsilon_{pr,i}}{r_p} \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon_{pr,i}$  为微单元径向应变。

根据以往研究成果, 当桩体处于弹性变形阶段时, 由胡克定律可知, 桩身微单元的应力应变关系为:

$$\begin{cases} \sigma_{pz,i} = \frac{E_p}{1+v_p} \left[ \frac{v_p}{1-2v_p} (2\varepsilon_{pr,i} + \varepsilon_{pz,i}) + \varepsilon_{pz,i} \right] \\ \sigma_{pr,i} = \frac{E_p}{1+v_p} \left[ \frac{v_p}{1-2v_p} (2\varepsilon_{pr,i} + \varepsilon_{pz,i}) + \varepsilon_{pr,i} \right] \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\sigma_{pz,i}$  为微单元竖向应力;  $\sigma_{pr,i}$  为微单元径向应力;  $E_p$  为碎石桩弹性模量;  $v_p$  为碎石桩泊松比;  $\varepsilon_{pz,i}$  为微单元竖向应变;  $\varepsilon_{pr,i}$  为微单元径向应变。

因此, 已知桩身微单元的竖向应力  $\sigma_{pz,i}$  和径向应力  $\sigma_{pr,i}$ , 就可计算出对应的竖向应变  $\varepsilon_{pz,i}$ , 即桩体微单元沉降, 从而求解出桩体的总沉降。

根据式(17), 微单元径向应变表达式为:

$$\varepsilon_{pr,i} = \frac{1}{E_p} [(1 - v_p) \sigma_{pr,i} - v_p \sigma_{pz,i}] \quad (18)$$

联立式(6)(15)和式(16), 便可算出筋材围限力的表达式为:

$$\sigma_{gr,i} = \frac{J_g}{E_p J_p - J_g (1 - v_p)} [(1 - v_p) \sigma_{sr,i} - v_p \sigma_{pz,i}] \quad (19)$$

土体围限力  $\sigma_{sr,i}$  和微单元上表面竖向应力  $\sigma_{pz,i}$  可分别由式(13)和式(5)计算得到, 再将筋材围限力和土体围限力代入式(6), 便得到桩单元的径向围限力, 则桩体微单元径向应力得解。

### 2.3 桩、土沉降计算

根据上述分析, 碎石桩与桩间土竖向变形可分别通过下式计算:

$$\begin{cases} \varepsilon_{pz,i} = \frac{\sigma_{pz,i} - 2v_p \sigma_{pr,i}}{E_p} \\ \varepsilon_{sz,i} = \frac{\sigma_{sz,i} - 2v_s \sigma_{sr,i}}{E_s} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\varepsilon_{pz,i}$  和  $\varepsilon_{sz,i}$  分别为第  $i$  段碎石桩与第  $i$  段桩间土的竖向应变。

将式(12)(18)代入式(6), 得到  $\sigma_{pr,i}$  后再与式(5)一并代入式(20), 即可得到第  $i$  段加筋段碎石桩的竖向应变。而对于非筋箍段, 只需令式(18)中筋材抗拉刚度  $J_g$  的值等于零, 所得结果即为第  $i$  段非筋箍段桩体微单元的竖向应变。将各段应变求和即得到桩体沉降。

由于本文将复合地基分为  $N$  段进行求解, 故可利用编程语言对问题进行计算, 思路如下:

给定桩土应力比范围与计算步长, 利用循环嵌套语句, 根据式(20)分别计算桩体压缩量  $\Delta S_p$  和土体压缩量  $\Delta S_s$ , 若两压缩量满足  $|\Delta S_p - \Delta S_s| \leq \delta$  ( $\delta$  为给定误差限), 则认为在该给定桩土应力比情况下, 满足本文的桩土等应变假设, 取此时的桩土应力比和复合地基沉降量为符合要求的计算值。再根据《建筑地基基础设计规范》<sup>[22]</sup>方法可得到下卧层土

体的沉降量, 从而计算出整个复合地基的沉降。在实际工程中, 采用散体材料加固处理软土地基时, 一般会设置褥垫层调整桩土应力比。该方法是将褥垫层在复合地基中的作用简化为桩土应力比  $n$ , 在计算复合地基沉降时以桩土等沉为收敛条件, 通过循环迭代, 可以得到合理的桩土应力比。同时该方法简便快捷, 避免了沉降公式过于复杂冗长的问题, 契合本文计算思路, 并且可以较快达到精度要求。计算流程如图 5 所示。

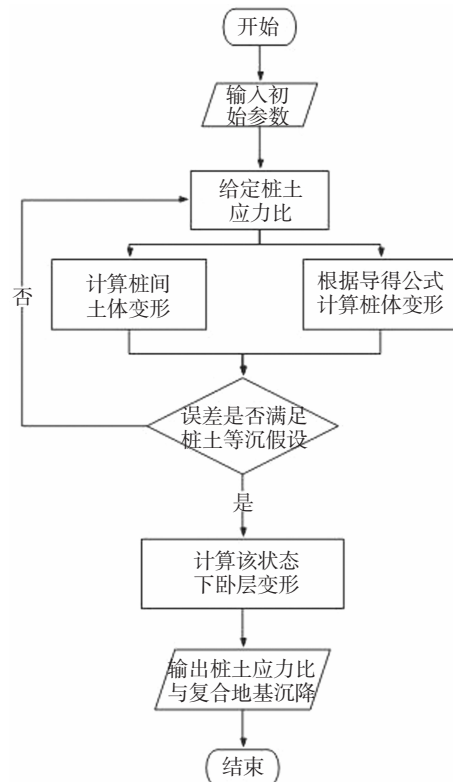


图 5 计算流程简图

Fig.5 Calculation flow diagram

## 3 工程实例验证与分析

### 3.1 算例验证

四川某绕城高速公路互通式立交桥 A 匝道, 采用土工格栅加筋碎石桩-砂垫层对路基进行加固处理<sup>[27]</sup>, 桩径  $d$  为 0.6 m, 桩长  $L$  为 6 m, 筋箍段长  $L_g$  为 2 m, 桩中心距  $s_d$  为 2.0 m, 正方形布桩; 碎石桩体压缩模量  $E_{sp}$  为 100 MPa, 泊松比  $v_p$  为 0.4, 重度  $\gamma_p$  为 20 kN/m<sup>3</sup>; 筋材抗拉刚度  $J_g$  为 120 kN/m, 总外荷载  $P_0$  为 132 kPa, 置换率 8.16%。根据桩土应力比、置换率和桩体荷载  $P_p$ 、土体荷载  $P_s$  之间的关系可知桩体荷载  $P_p$ 、土体荷载  $P_s$  分别为 350.84 kPa 和 112.45 kPa<sup>[10]</sup>; 路基实测沉降  $w_s$  为 110 mm<sup>[16]</sup>; 土层分布情况如图 6

所示.土层各参数信息如表1所示.

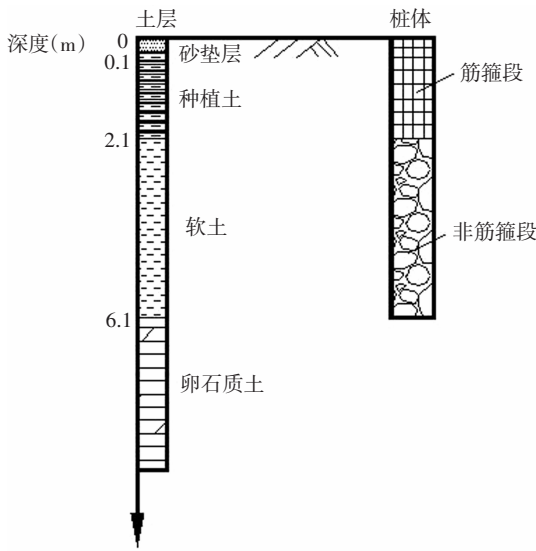


图6 土层分布示意图  
Fig.6 The soil distribution diagram

表1 土层信息表<sup>[16]</sup>  
Tab.1 Soil information table<sup>[16]</sup>

土层	L/m	$E_s$ /MPa	$v_s$	$c_s$ /kPa	$\varphi_s$ /( $^\circ$ )	$\gamma_s$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
砂垫层	0.1	20	0.4	—	—	17
种植土	2	6	0.4	—	31	17.5
软土	4	2.74	0.45	—	5.8	17.5
卵石质土	—	50	0.4	8	26	16

将表1中各参数值代入前文所示的沉降步骤计算公式中进行计算,当误差限 $\delta$ 取0.1 mm时,得到复合地基沉降计算值为116.3 mm,从工程实例中测得的沉降实测值为110 mm,二者的相对误差为+5.70%,可见本文沉降计算式所得结果与实测值吻合较好,能够满足工程要求,证明本文方法能够在一定程度上正确反映工程中的实际情况.

将以往文献对该实例的沉降分析结果与本文方法所得结果进行比较,如表2所示.

表2 工程实例沉降分析结果

Tab.2 Analytical results of settlement for the example

计算方法	计算沉降/cm	实测沉降/cm	相对误差/%
文献[15]方法	10.80	11.0	-1.82
文献[16]方法	11.70	11.0	+6.36
文献[28]方法	12.09	11.0	+9.90
本文方法	11.63	11.0	+5.70

一般来说,理论沉降计算结果通常为最终沉降值,由于实测值通常也是在一段时间内的观测值,而非最终沉降值,计算结果较实测值偏大是比较合理的,由表2可知,本文计算方法在偏于保守的结果中相对误差最小,可以从侧面证明本方法的合理性.

### 3.2 影响因素分析

筋箍碎石桩复合地基主要参数有土体性质参数、筋材性质参数、桩径以及面积置换率等.这些因素都在一定程度上影响着复合地基受力变形性质.以工程实例参数为基础,利用本文方法进一步探讨置换率对筋箍碎石桩复合地基的桩土应力比和总沉降的影响.分别改变置换率及复合地基顶面总外荷载,其他非讨论参数因素不变,得到筋箍碎石桩复合地基桩土应力比以及复合地基沉降量的变化曲线图,计算结果分别如图7和图8所示.

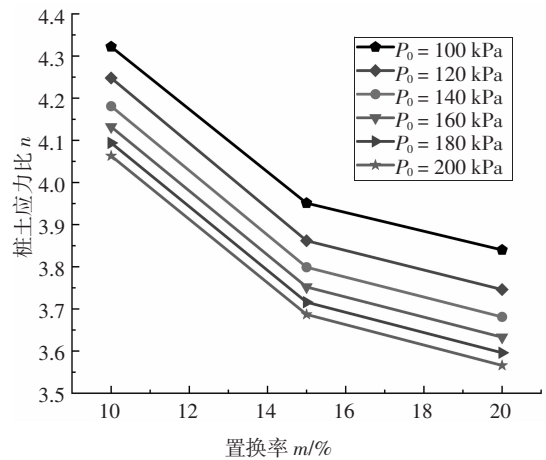


图7 n-m 曲线图

Fig.7 n-m relation curves

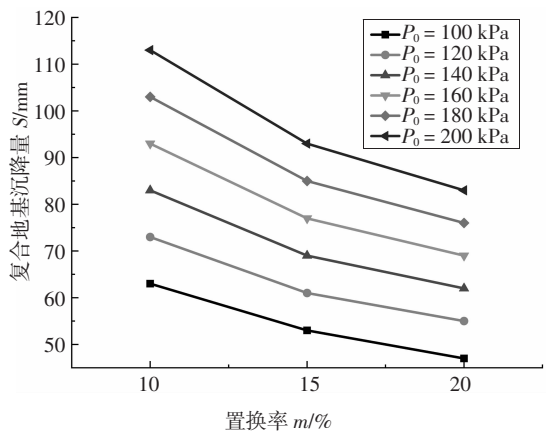


图8 S-m 曲线图

Fig.8 S-m relation curves

### 3.2.1 置换率对桩土应力比的影响

图7为筋箍碎石桩复合地基桩土应力比随置换率变化的变化趋势。可以看出,置换率一定时,随着外荷载增大桩土应力比减小,各级荷载下的减小程度相近,故增大置换率可以使桩土应力分布更加均匀,从而可以降低桩土应力比。相比较而言,桩土应力比在外荷载水平较低时偏大。

### 3.2.2 置换率对总沉降的影响

图8为筋箍碎石桩复合地基沉降随着复合地基置换率增加时两者的变化关系曲线。可以看出复合地基总沉降量随着置换率增加而减小,随着荷载增加而增加。而且在外荷载较大时,曲线斜率较大,故此若提高置换率可以比较明显地减小复合地基的沉降。

## 4 结论

本文在深入研究筋箍碎石桩复合地基受力变形的基础上,以单桩有效加固范围内的复合地基作为研究对象,结合现有学者在现场试验和理论研究等各方面的成果,得到了筋箍碎石桩复合地基的沉降计算新方法,并利用工程实例对该模型进行验证以及相应的参数分析。

1)基于厚壁圆筒理论,将单桩有效加固范围内的土体考虑为厚壁圆筒,充分考虑了桩、土、筋材三者之间的变形协调;

2)从加筋段实际受力状态出发,考虑筋材在任意应力条件下的应力,进而更加准确地反映筋箍碎石桩复合地基的沉降;

3)参数分析表明:提高置换率可以优化桩-土应力分布,减小桩土应力比,从而减小复合地基总沉降;

4)本文筋箍碎石桩沉降计算结果与工程实际测量结果吻合良好,证明了本文沉降计算方法能较准确反映筋箍碎石桩复合地基的受力变形情况。

## 参考文献

[1] 唐承铁,刘猛.加筋碎石桩格栅强度设计初探[J].公路工程,2012,37(6):25—28.  
TANG C T, LIU M. A tentative exploration on the strength design of

the geogrid in geosynthetic-encased stone columns [J]. Highway Engineering, 2012, 37(6):25—28. (In Chinese)

- [2] 陈庆. 格栅套筒加筋碎石桩复合地基承载力计算方法研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2011:11—12.  
CHEN Q. The research on the calculation method for eosynthetic-encased gravel pile composite foundation[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2011:11—12. (In Chinese)
- [3] 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, 2007:130—131.  
GONG X N. Theory and engineering application of composite foundation [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007:130—131. (In Chinese)
- [4] OMINE K, OHNO S. Deformation analysis of composite ground by homogenization method [C]// Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: Balkema A A, 1997:719—722.
- [5] AFSHAR J N, GHAZAVI M. Experimental studies on bearing capacity of geosynthetic reinforced stone columns [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2014, 39(3):1559—1571.
- [6] GU M, ZHAO M, ZHANG L, *et al.* Effects of geogrid encasement on lateral and vertical deformations of stone columns in model tests [J]. Geosynthetics International, 2016, 23(2):100—112.
- [7] ALMEIDA M S S, HOSSEINPOUR I, RICCIO M, *et al.* Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(3):04014116.
- [8] HONG Y S, WU C S, YU Y S. Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2016, 44(1):13—27.
- [9] 李小青, 周伟. 考虑桩土接触特性的复合地基承载机理的数值分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 529—532.  
LI X Q, ZHOU W. Numerical analysis on bearing capacity of composite foundation in consideration of contacting characteristics of pile-soil interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 529—532. (In Chinese)
- [10] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 碎石桩联合土工格栅复合地基处理湿地软基的机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1764—1768.  
CUI W, ZHANG Z G, YAN S W. Mechanism of composite ground with stone columns and geogrid in wetland [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6):1764—1768. (In Chinese)
- [11] YOO C. Settlement behavior of embankment on geosynthetic-encased stone column installed soft ground—A numerical investigation [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, 43(6):484—492.
- [12] KHABBAZIAN M, KALIYAKIN V N, MEEHAN C L. Column supported embankments with geosynthetic encased columns: validity of the unit cell concept [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(3):425—442.

- [13] HOSSEINPOUR I, RICCIO M, ALMEIDA M S S. Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2014, 42(4):363—373.
- [14] 曹文贵, 王江营, 罗忠涛, 等. 考虑桩-土滑移的柔性基础下复合地基沉降分析方法[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(6): 9—16.  
CAO W G, WANG J Y, LUO Z T, *et al.* Settlement calculation method for composite ground considering pile-soil slip under flexible foundation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(6): 9—16. (In Chinese)
- [15] 曹文贵, 杨泽华. 柔性基础下碎石桩加筋复合地基沉降分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(11):1997—2004.  
CAO W G, YANG Z H. Method for analyzing settlement of reinforced-gravel-pile composite ground under flexible foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(11): 1997—2004. (In Chinese)
- [16] 曹文贵, 赵聚才, 贺敏, 等. 柔性基础下筋箍碎石桩复合地基变形机理及其沉降分析方法 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(5): 818—826.  
CAO W G, ZHAO J C, HE M, *et al.* Deformation mechanism and settlement analysis method of reinforced-hoop-gravel-pile composite ground under flexible foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(5):818—826. (In Chinese)
- [17] 曹文贵, 唐旖旎, 王江营. 基于孔隙介质模型的散体材料桩复合地基沉降分层总和和分析方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(11): 87—95.  
CAO W G, TANU Y N, WANG J Y. A layer-wise summation analysis method for the settlement of composite ground with friable material piles based on porous medium model[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2014, 41(11): 87—95. (In Chinese)
- [18] ZHANG L, ZHAO M. Deformation analysis of geotextile-encased stone columns[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(3):04014053.
- [19] 张玲, 赵明华. 考虑鼓胀变形的散体材料桩复合地基沉降计算[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(5):120—124.  
ZHANG L, ZHAO M H. Settlement calculation of granular material pile composite foundation with consideration of lateral bulging[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(5): 120—124. (In Chinese)
- [20] ALAMGIR M, MIURA N, POOROOSHASB H B. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions [J]. *Computers and Geotechnics*, 1996, 18(4):267—290.
- [21] 章定文, 刘松玉. 路堤荷载下柔性桩复合地基沉降实用计算方法[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6):1133—1138.  
ZHANG D W, LIU S Y. Practical method for settlement calculation of flexible columns composite foundation under embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6):1133—1138. (In Chinese)
- [22] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011:28—30.  
GB 50007—2011 Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011:28—30. (In Chinese)
- [23] CASTRO J. An analytical solution for the settlement of stone columns beneath rigid footings[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 11(2): 1—16.
- [24] DEBNATH P, DEY A K. Bearing capacity of geogrid reinforced sand over encased stone columns in soft clay [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2017, 45(6):653—664.
- [25] CASTRO J. Groups of encased stone columns: Influence of column length and arrangement [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2017, 45(2):68—80.
- [26] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995:188—191.  
XU B Y, LIU X S. Applied elastic and plastic mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995:188—191. (In Chinese)
- [27] 黄兵. GSPS 软基加固系统机理及其在成都绕城高速公路的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2002:41—51.  
HUANG B. The mechanism of GSPS soft ground treatment system and its application in Chengdu City Highway [D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2002:41—51. (In Chinese)
- [28] 张赞威. 筋箍碎石桩复合地基承载机理及其变形分析[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2014:52—53  
ZHANG Z W. The analysis of geotextile encased stone columns composite foundation bear deformation mechanism [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014:52—53. (In Chinese)