

DOI: 10.11779/CJGE201911022

基于改进应变楔模型的固体-散体串联组合桩 鼓胀变形及沉降分析

郭尤林^{1,2}, 赵明华^{*1}, 彭文哲¹

(1. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘要: 针对传统碎石桩易在桩顶 1~3 倍桩径的深度范围内发生鼓胀破坏的现象, 首先, 在现有工艺的基础上提出一种固体(混凝土)-散体(碎石散体材料)串联组合桩, 并简要阐述其承载特性、施工工艺及破坏模式; 其次, 建立了串联组合桩鼓胀变形的计算模型, 探讨串联组合桩的鼓胀变形机理; 然后, 对应变楔模型进行修正, 并结合广义胡克定律, 计算固体-散体串联组合桩的鼓胀变形值及桩身沉降值; 最后, 通过传统碎石桩及筋箍碎石桩鼓胀变形及沉降试验验证所提理论方法的合理性, 结果表明: 理论计算值与试验结果吻合较好, 可为碎石桩复合地基设计提供一定的参考, 具有理论及工程应用价值。

关键词: 固体-散体串联组合桩; 鼓胀变形; 应变楔模型; 广义胡克定律; 沉降

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)11-2149-07

作者简介: 郭尤林(1982—), 男, 湖南益阳人, 博士研究生, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: guoyoulin0708@163.com。

Lateral bulgings and settlements of solid-bulk tandem compound piles based on modified strain wedge model

GUO You-lin^{1,2}, ZHAO Ming-hua¹, PENG Wen-zhe¹

(1. Geotechnical Engineering Institute, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: This paper is presented to respond to the phenomenon that swelling and failure are liable to appear within the top of the traditional gravel piles (within depth range of 1 to 3 times the pile diameter). Firstly, the solid (concrete)-bulk (gravel bulk material) tandem composite pile is proposed on the basis of the existing procedures, and the bearing mechanism, construction technology and failure mode of the tandem composite piles are introduced briefly. Secondly, a model for the bulging deformation of tandem composite piles is established to study the mechanism of the bulging deformation of tandem composite piles. Then, based on the modified strain wedge model and the generalized Hooke's law, the bulging deformations and settlements of the solid-bulk tandem composite piles are predicted. Finally, the proposed method is verified by the tests on the swelling deformations and settlements of the traditional gravel piles and reinforced-hoop-gravel piles. The comparative results show that the predicted values are in good agreement with the experimental ones, which indicates that the reference is thus provided, which is of theoretical and engineering application values for the design of the composite foundation of gravel piles.

Key words: solid-bulk tandem compound pile; lateral bulging; strain wedge model; generalization Hooke law; settlement

0 引言

碎石散体材料桩复合地基具有良好的加固性及经济性, 已被广泛应用于软土地基加固^[1-2]。相比于柔性桩及刚性桩等, 碎石桩竖向承载力主要依赖于桩周土体的侧限阻力。然而, 近地表土体所能提供的极限侧向约束力较小, 碎石桩易在桩顶 1~3 倍桩径的深度范围内发生鼓胀破坏^[3]。因此, 工程上通常全长或顶部加箍提高碎石桩承载力^[4-7] (筋箍碎石桩), 然而其处

治效果仍受近地表土的侧向约束力、筋材模量及筋箍工艺的影响。为进一步改善碎石桩承载性能及经济效益, 本文提出了一种固体(混凝土)-散体(碎石散体材料)串联组合桩。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478178); 湖南省教育厅科学研究项目一般项目(16C0304)

收稿日期: 2018-10-08

***通讯作者 (E-mail: mhzhao@21cn.com)**

目前,国内外诸多学者对碎石桩的研究多集中在极限承载力方面^[8-10],对鼓胀变形及沉降分析多为试验研究^[3, 11]及数值模拟^[12-14]。Murugesan等^[3]结合数值模拟及模型试验,探讨筋箍碎石桩的变形特性,结果表明加筋体能有效改善碎石桩的鼓胀变形。赵明华等^[11]基于大比例室内模型试验,对比传统碎石桩和筋箍碎石桩的承载变形特性,并探讨了筋箍碎石桩的鼓胀变形模式,即加筋体深度范围内的鼓胀变形明显减小,最大的鼓胀变形移至加筋体以下区域。Murugesan等^[12]及 Khabbazian等^[13]分别对筋箍碎石桩单桩进行二维及三维有限元数值模拟,认为筋箍碎石桩具有更高的承载能力及较小的压缩和侧向鼓胀,竖向加筋体能有效地减小碎石桩沉降。陈建峰等^[14]基于筋箍碎石桩复合地基室内模型试验,认为复合地基沉降随筋材模量的减小而增大。

综上可知,目前对传统碎石桩及筋箍碎石桩的研究已取得了一定的成果,但仍存在以下不足:①鼓胀变形及沉降分析多为室内模型试验或数值模拟,理论研究相对较少,不便于工程初步设计;②理论研究均假设碎石桩有效加固深度范围内的侧向土压力为静止土压力^[15-17],未能考虑鼓胀变形引起的侧向约束增大,用于考虑非极限状态下的沉降及鼓胀变形是不合适的;③关于本文提出串联组合桩的鼓胀变形及沉降分析的理论研究尚未得到研究。

针对以上不足,本文的研究思路主要如下所示:

①提出一种固体-散体串联组合桩,并简要阐述其承载特性、施工工艺及破坏模式;②建立了串联组合桩深层鼓胀变形计算模型,并基于改进应变楔模型及广义胡克定律,计算其鼓胀变形及沉降;③通过传统碎石桩及筋箍碎石桩模型试验,验证本文理论方法的合理性,以期完善碎石桩复合地基设计的理论研究。

1 承载特性及工艺特点

串联组合桩由混凝土段、混凝土与碎石有效衔接段及挤密碎石段3部分组成,如图1所示。其承载特性为:①混凝土段刚度较大,对桩周土体的侧限强度要求较小,因而可以有效地避免桩顶处发生鼓胀破坏;②混凝土浆液与碎石固结体则具有一定的胶结能力,并协同土体提供的侧限约束,从而有效减小鼓胀变形;③挤密碎石桩段所处深度较大,桩侧土体的侧限约束显著增大,能有效约束鼓胀变形。

串联组合桩在提高竖向承载能力的同时,还具有施工便捷、可实施性强及工程造价低等优点。其施工工艺如图2所示:①测量放线,确定桩位,将带活瓣桩尖的沉管置于指定桩位(图2(a));②借助振动机

将沉管沉入设计深度,每0.5 m暂停一次并保持振动1 min(图2(b));③往沉管中倒入碎石(图2(c));④向上拔管,仍开启振动机,拔管的速率控制在0.5至1.5 m/min,每1 m暂停一次并保持振动1 min(图2(d));⑤重复工序③和④,直至沉管达到指定高度(图2(e));⑥往沉管中灌注混凝土至地表高度(图2(f))。

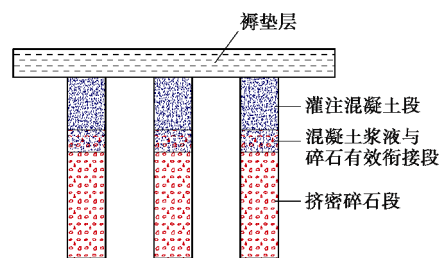


图1 固体-散体串联组合桩

Fig. 1 Solid-bulk tandem compound piles

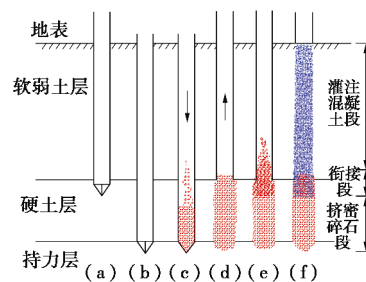


图2 串联组合桩施工工艺

Fig. 2 Construction technology of tandem compound piles

一般来说,碎石桩可能发生的破坏模式主要有:整体滑动破坏、整体剪切破坏、刺入破坏及鼓胀破坏。考虑串联组合桩混凝土段刚度大且抗剪能力较强,整体滑动破坏和剪切破坏的可能性较小;此外,一般认为持力层强度较大,可以提供足够的承载能力,故刺入破坏可能性也较小。基于此,本文认为串联组合桩的破坏模式为鼓胀破坏,即衔接段及碎石段发生鼓胀破坏,如图3所示。

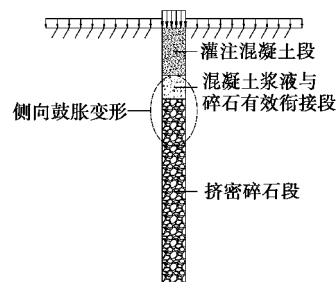


图3 串联组合桩鼓胀变形

Fig. 3 Lateral bulging of tandem compound piles

2 基于修正应变楔的鼓胀变形模型

当碎石桩发生鼓胀变形时,会对桩周土体产生挤

压, 土体发生侧向位移, 与水平受荷桩情况相似。鉴于以往多未能考虑鼓胀变形引起的围压增大, 故本文拟修正应变楔模型以分析鼓胀变形处的碎石桩围压。

2.1 应变楔模型

Norris^[18]及 Ashour 等^[19-20]认为基桩在承受水平荷载时, 桩顶至位移零点近似呈一条直线, 桩前存在如图 4~6 所示的应变楔。

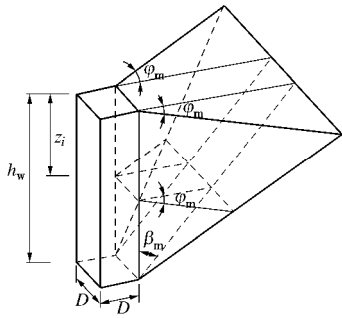


图 4 应变楔模型 (Ashour 等^[19-20])

Fig. 4 Strain wedge model (Ashour et al.^[19-20])

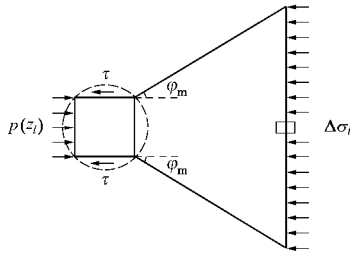


图 5 应变楔模型俯视图

Fig. 5 Vertical view of strain wedge model

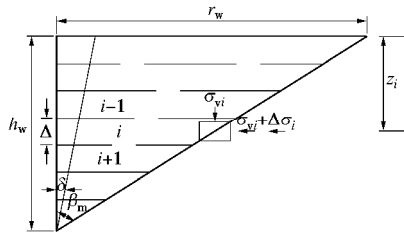


图 6 应变楔模型侧视图

Fig. 6 Elevation view of strain wedge model

图 4~6 中: h_w 为应变楔深度; z_i 为深度; D 为基桩边长或圆桩截面内接正方形边长; ϕ_m 为应变楔伞角, 即内摩擦角发挥值; β_m 为底角, 假定 $\beta_m = 45^\circ + \phi_m/2$ 。 Δs_i 为 z_i 深度处的水平应力增量; τ 为基桩与桩侧土体的摩擦力; $p(z_i)$ 为基桩受到的水平土抗力; r_w 为 z_i 深度处的应变楔长度, δ 为基桩的转角; s_{vi} 为竖向应力。

应变楔模型的重要参数为应力水平 S_L , 表示应变楔土体强度的发挥程度 (图 7), 其定义如式 (1) 所

示。

图 7 中, s_{v0} 为最小主应力, Δs_h 及 Δs_{hf} 分别对应内摩擦角发挥值 j_m 及 ϕ 时的差应力, Δu 为孔隙水压力。

$$S_L = \frac{\Delta s_i}{\Delta s_{hf}} = \frac{\tan^2(45^\circ + j_m/2) - 1}{\tan^2(45^\circ + j/2) - 1} \quad (1)$$

$$\Delta s_i = \Delta s_h = S_L \Delta s_{hf} \quad (2)$$

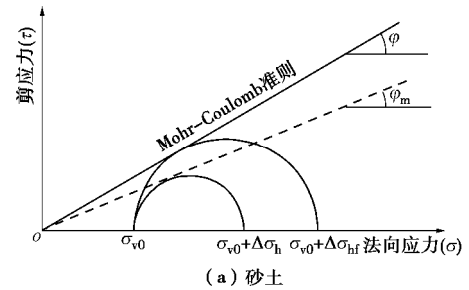
式中, Δs_{hf} 为水平应力增量的最大值,

$$\Delta s_{hf} = s_{v0} [\tan^2(45^\circ + j/2) - 1] \quad (\text{砂土}), \quad (3)$$

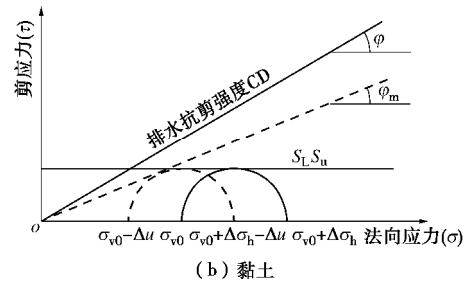
$$\Delta s_{hf} = 2S_u \quad (\text{黏土}). \quad (4)$$

黏土中的 j_m 满足

$$\tan^2\left(45 + \frac{j_m}{2}\right) = \frac{s_{v0} + \Delta s_h - \Delta u}{s_{v0} - \Delta u} \quad (5)$$



(a) 砂土



(b) 黏土

图 7 莫尔-库仑破坏准则及内摩擦角发挥值 ϕ_m

Fig. 7 Mohr-Coulomb failure criterion and mobilized effective friction angle ϕ_m

限于篇幅, 本文仅介绍应变楔模型中最重要的基本参数, 其余参数的取值及关系 (如 Δu , δ 与 ε , S_L 与 ε 等) 请详见文献^[19]。

2.2 改进应变楔模型

目前国内外已有一些学者对应变楔模型进行改进 (李忠诚等^[21-22]、Ashour 等^[23]、Xu 等^[24-25]、杨晓峰等^[26-27]), 以适用于不同的工况; 然而以上修正模型并不适用于分析碎石桩的鼓胀变形。因而, 本文拟修正应变楔模型以分析串联组合桩鼓胀变形及其沉降, 其整体力学分析模型如图 8 所示, 修正应变楔三维示意图及俯视图如图 9, 10 所示。

图 8~10 中, q_p 为桩顶作用荷载, q_s 为桩周土作用荷载, h_1 , h_2 及 h_3 分别为混凝土段、衔接段及碎石

段的长度; g 为土体重度; r_p 为碎石桩桩径。

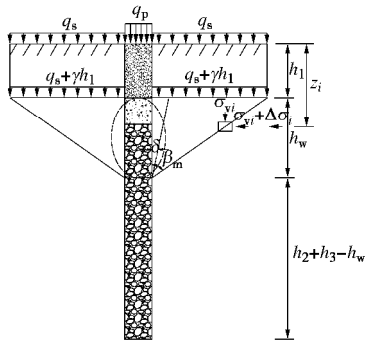


图8 串联组合桩鼓胀变形模型

Fig. 8 Lateral bulging model for tandem compound piles

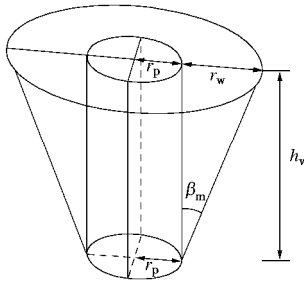


图9 改进应变楔模型

Fig. 9 Modified strain wedge model

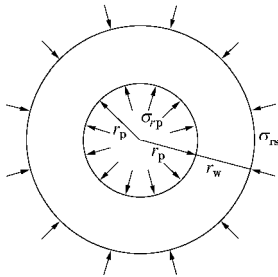


图10 改进应变楔模型俯视图

Fig. 10 Top view of modified strain wedge model

本文对应变楔模型的改进内容如下: ①改进后的应变楔为倒圆台状, 圆台母线与垂直方向的夹角为底角 β_m 。②改进应变楔的剖面图与 Ashour 等^[19-20]的应变楔侧视图一致, 但俯视图为圆环形 (图 10)。如图 11 所示, 取 $d\theta$ 部分进行受力分析, s_{rs} 的计算方法与 Δs_i 相同^[19], s_{rp} 与 s_{rs} 满足式 (6)。③分析水平受荷桩时, 侧向土抗力考虑为应力增量, 即 Δs_i ; 而碎石桩围压应考虑为 $s_{vi} + \Delta s_i$ 。

$$s_{rs} r_p dq = s_{rs} (r_p + r_w) dq \quad (6)$$

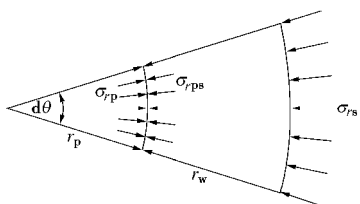


图11 静力平衡

Fig. 11 Static equilibrium

3 鼓胀变形及沉降分析

如图 12 所示, 沿桩长方向将桩划分为 N 段, 并取其中的第 i 段进行受力分析 (图 13)。假定碎石散体材料桩为弹性均质体, 根据广义胡克定律, 第 i 段单元的应力应变关系可表示为

$$\begin{cases} s_{zp,i} = \frac{E_p}{1+m_p} \left[\frac{m_p}{1-2m_p} (2e_{r,i} + e_{z,i}) + e_{z,i} \right], \\ s_{rp,i} = \frac{E_p}{1+m_p} \left[\frac{m_p}{1-2m_p} (2e_{r,i} + e_{z,i}) + e_{r,i} \right]. \end{cases} \quad (7)$$

式中 $s_{zp,i}$ 及 $s_{rp,i}$ 分别第 i 段单元的竖向及径向应力; $e_{z,i}$ 及 $e_{r,i}$ 分别为第 i 段单元的竖向及径向应变; E_p 及 μ_p 分别为碎石桩体弹性模量及泊松比。

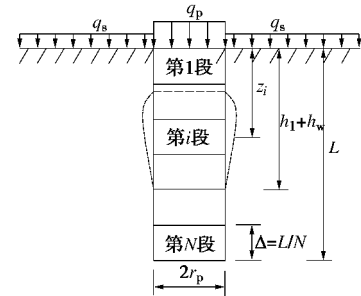


图12 基桩单元的划分

Fig. 12 Division of pile elements

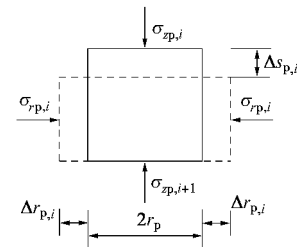


图13 第i段单元的应力应变关系

Fig. 13 Stress-strain relationships of ith element

令 $k_i = -e_{r,i} / e_{z,i}$, 则式 (7) 可写为

$$\begin{cases} s_{zp,i} = \frac{E_p}{1-m_p-2m_p^2} \left[2m_p - \frac{1-m_p}{k_i} \right] e_{r,i}, \\ s_{rp,i} = \frac{E_p}{1-m_p-2m_p^2} \left(1 - \frac{m_p}{k_i} \right) e_{r,i}. \end{cases} \quad (8)$$

又由式 (8) 可得

$$\begin{cases} \frac{s_{rp,i}}{s_{zp,i}} = \frac{k_i - m_p}{2m_p k_i - (1-m_p)}, \\ e_{z,i} = \frac{s_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1-m_p-2m_p^2}{(1-m_p)-2m_p k_i}, \\ e_{r,i} = \frac{s_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1-m_p-2m_p^2}{2m_p - \frac{1-m_p}{k_i}}. \end{cases} \quad (9)$$

引入几何关系 $e_{z,i} = \Delta s_{p,i} / \Delta$ 及 $-e_{r,i} = -\Delta r_{p,i} / r_p$, 联立式 (9) 可得第 i 段单元的竖向及径向变形分别为

$$\begin{cases} \Delta s_{z,i} = \Delta \cdot \frac{s_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1-m_p-2m_p^2}{(1-m_p)-2m_p k_i}, \\ \Delta r_{r,i} = -r_p \cdot \frac{s_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1-m_p-2m_p^2}{2m_p - \frac{1-m_p}{k_i}}. \end{cases} \quad (10)$$

式中, 各参数的确定方法如下:

(1) 侧向约束力 s_{rps} 的确定: 鼓胀变形处的侧向约束由修正应变楔模型确定; 未鼓胀变形处的桩侧土压力可视为 $K_s(g_s z + q_s)$, g_s 为土体重度, K_s 为静止土压力系数。

(2) k_i 的确定: 基于桩土界面的径向应力平衡, 鼓胀变形段桩径向应力 $s_{rp}(z)$ 等于桩周土的侧向约束力 $s_{rps}(z)$, 联合式 (9), 即可求得第 i 段单元的 k_i 为

$$k_i = \frac{m_p s_{zp,i} - (1-m_p) s_{rs,i}}{s_{zp,i} - 2m_p s_{rs,i}}. \quad (11)$$

(3) 第 $i+1$ 段单元竖向应力 $s_{zp,i+1}$ 的确定: 由第 i 段单元竖向力的平衡条件可得深度 z_{i+1} 处的竖向应力 $s_{zp,i+1}$ 为

$$s_{zp,i+1} = s_{zp,i} + g_p \Delta - \frac{2t_{ps,i} \Delta}{r_p + \Delta r_{p,i}}. \quad (12)$$

式中 g_p 为碎石桩重度; $t_{ps,i} = s_{zp,i} \tan \varphi_{ps} + c_{ps}$; φ_{ps} , c_{ps} 分别为桩土接触面的内摩擦角和黏聚力。

通过假定 φ_m (或应变楔底面处的 e) 即可确定径向变形 Δr_{sw} 及侧向约束力 s_{rps} , 通过 s_{rps} 及本节内容可确定 $\Delta r_{r,i}$ 。由 $\Sigma |\Delta r_{sw} - \Delta r_{r,i}|$ 可知假定的内摩擦角发挥值是否合理, 若 $\Sigma \Delta r_{sw} > \Sigma \Delta r_{r,i}$ 则说明所假定 φ_m 大于实际值, 此时应适当减小假设值; 若 $\Sigma \Delta r_{sw} < \Sigma \Delta r_{r,i}$ 则说明所假定 φ_m 小于实际值, 应适当减小假设值。

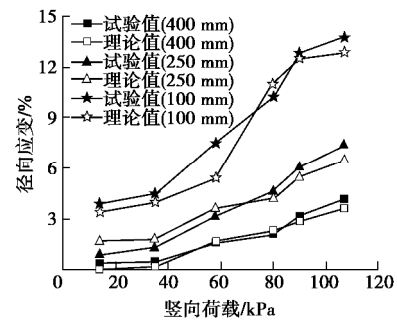
4 试验验证

赵明华等^[11]进行了传统碎石桩及箍筋碎石桩室内模型试验, 基本参数如下: 碎石桩的弹性模量为 15 MPa, 碎石桩的泊松比为 0.2, 碎石的剪胀角为 15° , 土工格栅的拉伸刚度为 680 kN/m, 土的压缩模量为 1.6 MPa, 不排水抗剪强度为 3.4 kPa, 土的泊松比为 0.2。碎石桩直径为 200 mm, 箍筋碎石桩加筋深度为 2 倍桩径。

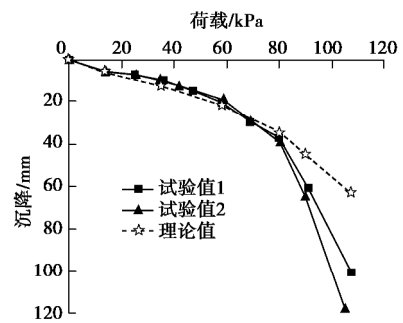
采用本文理论方法对传统碎石桩及箍筋碎石桩的鼓胀变形及沉降进行计算, 将理论计算值与文献[11]的试验值进行对比, 对比结果如图 14 所示。

由图 14 (a), (b) 可知: ①本文鼓胀变形理论值与文献[11]中的试验值的变化趋势一致且吻合较好, 说明本文方法用于分析串联组合桩及传统碎石桩的鼓

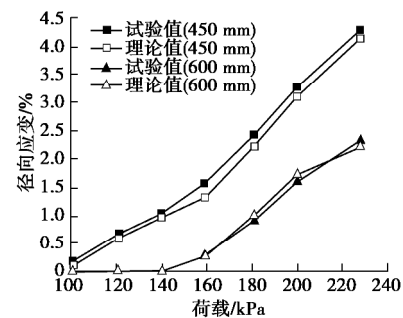
胀变形是可行的。②本文沉降理论值与文献[11]中的试验值的变化趋势一致且在 0~70 kPa 范围内吻合较好, 说明本文方法用于分析串联组合桩及传统碎石桩的沉降是可行的。当荷载大于 70 kPa 时, 理论值与试验值存在较大误差的原因可能是: 当竖向荷载较大时, 碎石桩发生明显鼓胀变形。然而本文在计算其沉降时, 仍将鼓胀段视为弹性均质体, 与实际情况存在较大偏差。



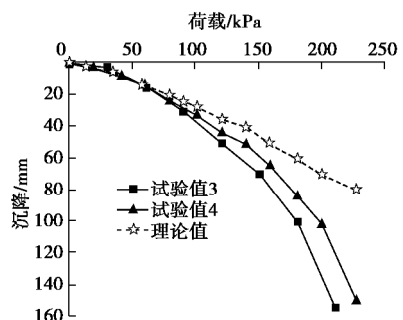
(a) 传统碎石桩的鼓胀变形



(b) 传统碎石桩的沉降



(c) 筋箍碎石桩的鼓胀变形



(d) 筋箍碎石桩的沉降

图 14 传统碎石桩及筋箍碎石桩的鼓胀变形及沉降
Fig. 14 Lateral bulgings and settlements of traditional stone columns and geogrid-encased stone columns

由图 14 (c), (d) 可知: ①本文鼓胀变形理论值与文献[11]中的试验值的变化趋势一致且吻合较好, 说明本文方法用于分析串联组合桩及传统碎石桩的鼓胀变形是可行的。②本文沉降理论值与文献[11]中的试验值的变化趋势一致, 且荷载较小时二者吻合较好, 说明本文方法用于分析串联组合桩及筋箍碎石桩的沉降是可行的。当荷载较大时, 理论值与试验值存在明显差别的可能原因如下: ①当竖向荷载较大时, 碎石桩发生明显鼓胀变形。然而本文在计算其沉降时, 仍将鼓胀段视为弹性均质体, 与实际情况存在较大偏差。②实际情况中加筋段也会发生一定程度的鼓胀变形, 而本文进行理论计算时将加筋段按弹性均质体进行考虑。

5 结 论

(1) 针对传统碎石桩易在桩顶 1~3 倍桩径的深度范围内发生鼓胀破坏的现象, 提出了一种固体-散体串联组合桩, 并简要介绍其承载特性及施工工艺, 认为其破坏模式为鼓胀破坏。

(2) 建立了串联组合桩鼓胀变形的计算模型, 并对应变楔模型进行改进, 以分析鼓胀变形处的土体围压。

(3) 基于改进应变楔模型及广义胡克定律, 推导鼓胀变形及沉降的计算公式; 并通过传统碎石桩及筋箍碎石桩室内模型试验验证本文理论方法的合理性。

参考文献:

- [1] 赵明华, 俞 晓. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003. (ZHAO Ming-hua, YU Xiao. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 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. (GONG Xiao-nan. Theories and application of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [3] MURUGESAN S, RAJAGOPAL K. Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136(1): 129 - 139.
- [4] 周志刚, 张起森, 郑健龙. 土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析[J]. 土木工程学报, 1998, 31(1): 20 - 25. (ZHOU Zhi-gang, ZHANG Qi-sen, ZHENG Jian-long. Analysis of mechanics of improved ground with stone columns reinforced by geogrids[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(1): 20 - 25. (in Chinese))
- [5] GNIEL J, BOUAZZA A. Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(3): 167 - 175.
- [6] LO S R, ZHANG R, MAK J. Geosynthetic-encased stone columns in soft clay: a numerical study[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(3): 292 - 302.
- [7] CASTRO J, SAGASETA C. Deformation and consolidation around encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 268 - 276.
- [8] 陈昌富, 李其泽. 基于圆孔扩张理论顶部加箍碎石桩承载力计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(10): 7 - 12. (CHEN Chang-fu, LI Qi-ze. Calculation of bearing capacity of geosynthetic-encased gravel pile based on expansion theory[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(10): 7 - 12. (in Chinese))
- [9] 赵明华, 龙 军, 张 玲, 等. 不同型式复合地基试验对比分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 611 - 618. (ZHAO Ming-hua, LONG Jun, ZHANG Ling, et al. Comparative analysis of model tests on different types of composite foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 611 - 618. (in Chinese))
- [10] 赵明华, 何玮茜, 衡 帅, 等. 基于圆孔扩张理论的筋箍碎石桩承载力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1785 - 1792. (ZHAO Ming-hua, HE Wei-xi, HENG Shuai, et al. Calculation method of geogrid-encased stone columns' bearing capacity based on cavity expansion theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1785 - 1792. (in Chinese))
- [11] 赵明华, 顾美湘, 张 玲, 等. 竖向土工加筋对碎石桩承载变形影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1587 - 1593. (ZHAO Ming-hua, GU Mei-xiang, ZHANG Ling, et al. Model tests on influence of vertical geosynthetic-encasement on performance of stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1587 - 1593. (in Chinese))
- [12] MURUGESAN S, RAJAGOPAL K. Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(6): 349 - 358.
- [13] KHABBAZIAN M, KALIAKIN V N, MEEHAN C L. Numerical study of the effect of geosynthetic encasement on the behaviour of granular columns[J]. Geosynthetics International, 2010, 17(3): 132 - 143.
- [14] 陈建峰, 童振涓, 柳军修, 等. 竖向荷载下加筋碎石桩复合地基数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 393 - 399.

- (CHEN Jian-feng, TONG Zhen-mei, LIU Jun-xiu, et al. Numerical analyses of composite foundation of geosynthetic-encased stone columns subjected to vertical loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 393 - 399. (in Chinese))
- [15] 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 Ding-wen, LIU Song-yu. Practical method for settlement calculation of flexible columns composite foundation under embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(6): 1133 - 1138. (in Chinese))
- [16] 刘杰, 赵明华, 何杰. 碎石桩复合地基承载及变形性状研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2007, **34**(5): 15 - 19. (LIU Jie, ZHAO Ming-hua, HE Jie. Research on bearing and deformation characters of composite foundation with granular columns[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2007, **34**(5): 15 - 19. (in Chinese))
- [17] 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 Wen-gui, YANG Ze-hua. 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))
- [18] NORRIS G M. Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling. Paris, 1986: 361 - 386.
- [19] ASHOUR M, NORRIS G, PILLING P. Lateral loading of a pile in layered soil using the strain wedge model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(4): 303 - 315.
- [20] ASHOUR M, PILLING P, NORRIS G. Lateral behavior of pile groups in layered soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(6): 580 - 592.
- [21] 李忠诚, 杨敏. 被动桩土压力计算的被动拱-主动楔模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 4241 - 4247. (LI Zhong-cheng, YANG Min. Passive arching-active wedge model of soil pressure calculation in passive piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 4241 - 4247. (in Chinese))
- [22] 李忠诚, 梁志荣. 侧移土体成拱效应及被动桩计算模式分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 113 - 118. (LI Zhong-cheng, LIANG Zhi-rong. Soil arching effect and calculation model for soil pressure of passive piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 113 - 118. (in Chinese))
- [23] ASHOUR M, ARDALAN H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2012, **39**(10): 85 - 97.
- [24] XU L Y, CAI F, WANG G X, et al. Nonlinear analysis of laterally loaded single piles in sand using modified strain wedge model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **51**(3): 60 - 71.
- [25] XU L Y, CAI F, XUE Y Y. Implementation of state-dependent plasticity model in strain wedge model for laterally loaded piles in sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, **37**(5): 622 - 632.
- [26] 杨晓峰, 张陈蓉, 黄茂松, 等. 砂土中桩土侧向相互作用的应变楔模型修正[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2877 - 2884, 2892. (YANG Xiao-feng, ZHANG Chen-rong, HUANG Mao-song, et al. Modification of strain wedge method for lateral soil-pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(10): 2877 - 2884, 2892. (in Chinese))
- [27] YANG X F, ZHANG C R, HUANG M S, et al. Lateral loading of a pile using strain wedge model and its application under scouring[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, **36**(3): 340 - 350.