

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.008

强夯碎石桩复合地基固结特性分析

张小莉, 伍翔飞, 王迎丰, 曾华健

(江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210009)

摘要: 针对强夯碎石桩处理上软下硬地层条件, 结合工程实践建立碎石桩复合地基模型进行三维渗流固结数值计算, 重点研究了桩身贯入比、桩土模量比、桩土置换率及地基刚度比对碎石桩复合地基固结特性的影响, 最后对碎石桩复合地基固结设计中的规范法与三维数值法计算结果进行对比。结果表明, 强夯碎石桩复合地基固结速率随桩身贯入比、桩土模量比、桩土置换率及地基刚度比的增大而增大, 桩端未打穿上部软土层时, 复合地基固结速率最慢, 导致工后沉降最大而地基承载力最小。强夯碎石桩复合地基设计需考虑地基处理效果及工程造价的平衡性。在进行强夯碎石桩复合地基固结计算时, 可采用规范方法进行初步设计。

关键词: 强夯碎石桩; 复合地基; 固结; 数值分析

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0056-06

Consolidation Behavior Analysis of Dynamic Compaction Stone Columns Reinforced Foundation

ZHANG Xiaoli, WU Xiangfei, WANG Yingfeng, ZENG Huajian

(Jiangsu Geotechnical Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: According to the conditions of dynamic compaction stone columns treating upper soft and lower hard stratum, combined with engineering practice, a stone columns reinforced foundation model is established for three-dimensional seepage consolidation numerical calculation, focusing on the effects of pile penetration ratio, pile-soil modulus ratio, pile-soil replacement rate and foundation stiffness ratio on the consolidation characteristics of stone columns reinforced foundation. Finally, the calculation results of code method and three-dimensional numerical method in the consolidation design of stone columns reinforced foundation are compared. The results show that the consolidation rate of stone columns reinforced foundation improvement with the increase of pile penetration ratio, pile-soil modulus ratio, pile-soil replacement rate and foundation stiffness ratio. When the pile end does not penetrate the upper soft soil layer, the consolidation rate of composite foundation is the slowest, resulting in the maximum post construction settlement and the poor foundation bearing capacity. The balance of foundation treatment effect and project cost should be considered in the design of dynamic compaction stone columns reinforced foundation. In the consolidation calculation of dynamic compaction stone columns reinforced foundation, the code method can be used for preliminary design.

Keywords: dynamic-compaction stone column; composite foundation; consolidation; numerical analysis

随着我国经济社会的发展, 相应的基础设施建设工程也稳步推进, 对应于工程建设中遇到的软弱不良地基问题也日益增多, 故需要对该类地基进行预加固处理, 提高地基承载力以满足上部主体结构的正常使用要求, 强夯碎石桩作为一种散体材料地

基加固方法, 目前已广泛应用于软弱地基加固、砂土液化及湿陷性黄土处理等工程^[1]。

当前强夯碎石桩已形成多种不同施工工艺。孔内强夯碎石桩复合地基通过机械预成孔后, 将碎石等大直径粗颗粒填料置入孔中, 随后边填料边夯击

直至设计标高,在夯击过程中碎石颗粒被强行挤入周边软土中,对桩间软土起到了一定的置换及挤密作用,提高了桩间土的承载力。同时挤密后的桩间土又可反向作用于碎石桩,起到对碎石桩的围箍作用,可较好的改善原天然地基承载力^[2-3]。

与传统粘结材料桩(CFG桩、预制桩等)不同的是,强夯碎石桩在加固天然地基的同时,除置换及挤密作用外,亦兼顾有促进排水固结的作用,尤其在饱和软土层强夯施工过程中,可加快土体孔压消散,加速软土固结,缩短碎石桩复合地基的预加固时间,减小工后沉降^[4-6]。

当前针对碎石桩复合地基固结性已有较多研究,大多基于砂井地基固结理论^[7],探究了附加荷载加载性质(瞬时加载或分级加载)^[8-9],并阻与涂抹^[10],桩体面积置换率及桩土模量比^[11],桩体竖向变形及桩体径竖向渗透性^[12-13],含混凝土芯^[14]等因素对碎石桩复合地基固结特性的影响。

已有研究揭示了碎石桩复合地基固结特性及多种影响因素对固结效果的影响,但多是关于桩体加固单一土层及落底情形的研究,而对上下土层性质差异较大,且桩端打穿上部软土等情况下的强夯碎石桩复合地基固结效果的研究较少^[15]。本研究以 Biot 饱和固结理论为基础利用有限元方法对上软下硬地层强夯碎石桩复合地基的固结特性进行研究,以期得到一些有益结论供类似工程参考。

1 Biot 固结理论

碎石桩复合地基中桩身的排水固结从理论上属于土体的 Biot 三维渗流固结作用,Biot 固结理论以连续介质的基本方程为基础,可准确反映土体孔隙水压力消散与土骨架变形相互关系,同时考虑了土体单元三个方向的排水及变形。假设土体饱和,以土骨架本构方程、几何方程、平衡方程及饱和土体的连续性方程联立可得到以位移及孔隙水压力表示的 Biot 三维固结微分方程:

$$\begin{cases} -G\nabla^2 u^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G\nabla^2 v^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G\nabla^2 w^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \\ -\frac{\partial \Delta}{\partial t} + \frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 u = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, $\Delta = \frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z}$;

k 为渗透系数; G 为剪切模量; ν 为泊松比; u^s, v^s, w^s 分别为土体单元在三个方向的位移; u 为孔隙水压力。

基于上述 Biot 固结微分方程以有限元数值方法计算饱和土体碎石桩复合地基的三维固结解。

2 数值计算模型

2.1 分析模型

基于实际工程经验,强夯碎石桩加固软土地基通常采用两遍点夯结合一遍满夯,第一遍点夯以矩形布桩,第二遍点夯在第一遍基础上按梅花形内插,最后以低能量满夯一遍。在施工过程中采用机械预成孔,成孔直径 800 mm ~ 1 200 mm,桩端穿过预处理软土层进入下部密实土层,随后边填料边夯击形成碎石桩体,成桩直径 1 400 mm ~ 1 600 mm,全场依次布点施工形成碎石桩复合地基,其中碎石桩复合地基平面布置如图 1 所示,图中 D 表示第一遍布点间距。基于碎石桩平面对称布点特征,选取其中矩形区域($D \times D$)作为分析对象,建立该分析对象的计算模型剖面图如图 2 所示,该计算模型上部为饱和软黏土,下部为天然密实黏土,同时考虑碎石桩成桩过程中对桩间土的扰动作用(涂抹区),即该区域土体渗透性与未扰动区域间存在一定差异,对碎石桩复合地基的固结效果产生一定的影响。其中 E_{s1}, E_{s2}, E_p 分别为桩间土(上部软土)、下部密实土及桩身的压缩模量, k_{h1}, k_{v1} 及 k_{sh}, k_{sv} 分别为桩间土非涂抹区与涂抹区的水平、竖向渗透系数, k_{h2}, k_{v2} 为下卧土层水平、竖向渗透系数, k_p 为桩体平均渗透系数, h_1, h_2, H 分别为上下土层厚度及总土层厚度, R_p, R_s 分别为桩身及涂抹区半径。模型顶部施加瞬时荷载 q 模拟附加荷载。

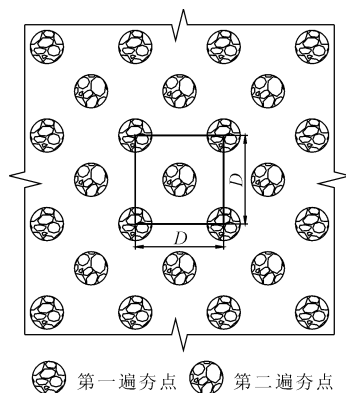


图 1 碎石桩复合地基平面布置

2.2 模型建立

以碎石桩复合地基计算模型为基础,建立碎石

桩复合地基数值计算模型如图 3 所示。模型尺寸 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 15\text{ m}$, 为简化建模及计算, 碎石桩模型按等面积法建立为矩形截面, 截面尺寸:

$$d = \sqrt{\pi R_p^2} \quad (2)$$

式中: d 为矩形截面尺寸; R_p 为桩身半径。

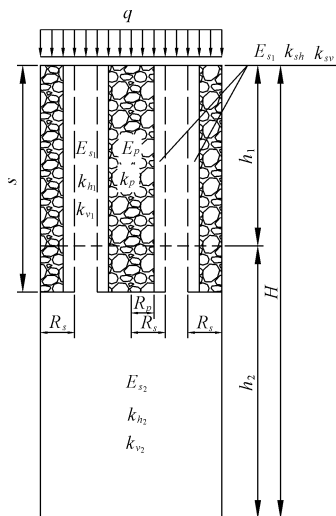


图 2 计算模型剖面

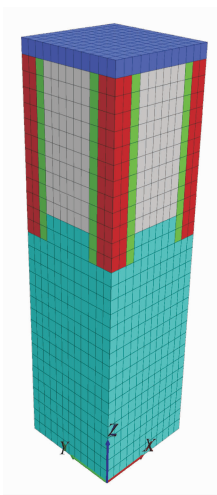


图 3 数值计算模型

模型碎石桩体、桩间土及下卧土体均采用饱和土体线弹性模型, 单元类型 C3D8P 渗流应力耦合孔压单元。其中桩体半径 $R_p = 0.75\text{ m}$, 涂抹区半径 $R_s = 1.5R_p = 1.125\text{ m}$ 。计算范围土层总厚度 $H = 15\text{ m}$, 其中上部土层厚度 $h_1 = 5\text{ m}$, 下部土层厚度 $h_2 = 10\text{ m}$ 。模型基本计算参数为桩间土(未扰动区): $k_{h1} = 2k_{v1} = 2^{-10}\text{ m/s}$, $E_{s1} = 2.5\text{ MPa}$, $v = 0.35$, $e_1 = 1.2$; 桩间土(扰动区): $k_{sv} = 2k_{sh} = 2^{-10}\text{ m/s}$, $E_{s1} = 2.5\text{ MPa}$, $v = 0.35$, $e_1 = 1.2$ 。下卧层: $k_{h2} = k_{v2} = 2^{-8}\text{ m/s}$, $E_{s2} = 7.5\text{ MPa}$, $v = 0.3$, $e_2 = 0.8$ 。碎石桩: $k_p = 5^{-4}$

m/s , $E_p = 50\text{ MPa}$, $v = 0.3$, $e_p = 0.9$ 。附加荷载考虑为 70 kPa 。模型初始边界条件设置为四周及底部不排水, 顶部设置孔压为 0 自由排水, 附加荷载一次瞬时施加。

2.3 模型验证

为验证采用数值方法进行复合地基固结计算的合理性。首先建立天然地基单层三维饱和各向同性线弹性模型进行固结计算, 将计算结果与经典 Terzaghi 一维渗流固结解答进行对比; 其次参考文献[16], 建立碎石桩复合地基模型进行渗流固结计算, 模型参数同文献[16], 将计算结果与文献[16]相应结果进行对比。两种对比结果分别示于图 4, 图中为方便比较, 将时间变量 t 换算为时间因数 T_v , 换算公式如下^[17]:

$$T_v = C_v t / H^2 \quad (3)$$

$$C_v = E_s k / \gamma_w \quad (4)$$

式中: T_v 为无量纲时间因数; C_v 为固结系数, m^2/s ; t 为时间变量, s ; H 为渗流路径长度, m ; E_s 为压缩模量, MPa ; k 为渗透系数, m/s ; γ_w 为水的重度, N/m^3 。

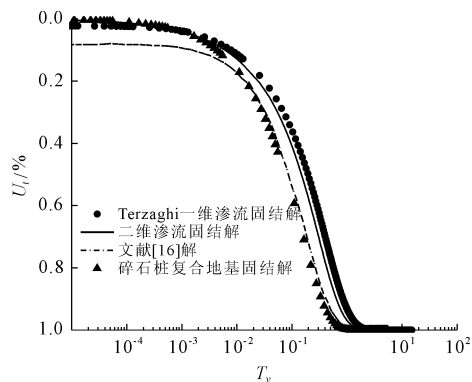


图 4 渗流固结结果对比

由图 4 可知, 考虑渗流固结的空间性时, 天然地基固结速率较 Terzaghi 一维渗流固结快, 表明在进行天然地基固结计算时, 若采用 Terzaghi 一维渗流计算结果将偏保守, 但整体误差相差不大。

采用有限元方法建立碎石桩复合地基三维模型进行渗流固结数值计算, 其中碎石桩底考虑至模型底部, 模型四周及底面限制位移及排水, 顶部自由排水。计算结果与文献[16]在固结曲线变化规律上具有较高的一致性, 表明了所建立三维碎石桩复合地基数值模型的合理性。

3 固结特性分析

以文中所建立的数值模型为基础, 考虑碎石桩

工程应用中的多种影响因素,分析桩身贯入比、桩土模量比、桩土置换率及地基刚度比对碎石桩复合地基固结特性的影响。

3.1 桩身贯入比

碎石桩作为一种散体材料桩,适宜于处理软黏土地基,同时由于桩身材料的多孔性,可作为竖向排水通道加速饱和软黏土的固结,工程应用中,上覆软黏土通常厚度不均,性状各异,而底部为在自重作用下已固结完毕的密实黏土。碎石桩成孔施工中,对上覆软土进行充分预加固处理,减少工后沉降,桩端需进入下部密实土层一定深度,以满足复合地基承载力要求,鉴于上下土层力学性状及渗透性差异较大,桩端入密实土层厚度必然影响碎石桩复合地基整体固结性状。基于此,设桩身贯入比 $\lambda = s/h_1$, 其中 s 为桩端入土深度长度,研究桩身贯入比 λ 对碎石桩复合地基固结性状影响,得到不同 λ 下碎石桩复合地基固结度 U_t 随时间因数 T_v 变化的对比结果如图 5 所示。

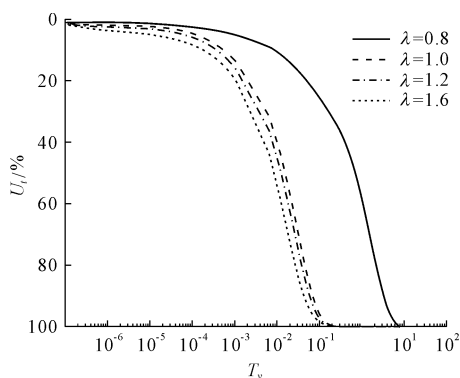


图 5 桩身贯入比 λ 对固结效率影响

由图 5 可知,碎石桩复合地基固结效率随桩身贯入比 λ 的增大而增大,当 λ 为 0.8 时,碎石桩复合地基的固结效率最慢,达到完全固结的时间更长。在 λ 由 0.8 增大至 1.0 时,固结效率增幅最大,而由 1.0 增大至 1.6 时,固结效率增幅减缓。表明碎石桩桩端穿透上部预加固软土层与否对复合地基的固结效率具有重要影响。

3.2 桩土模量比

工程应用中,预加固地基土性状因地域性而存在较大差异,即桩间土压缩模量不仅影响复合地基承载力及工后沉降值,同时对复合地基的固结性状产生一定影响。基于此,设桩土模量比 $n = E_p/E_s$, 研究桩土模量比 n 对碎石桩复合地基固结性状影响,得到不同 n 下碎石桩复合地基固结度 U_t 随时间因数 T_v 变化的对比结果如图 6 所示。

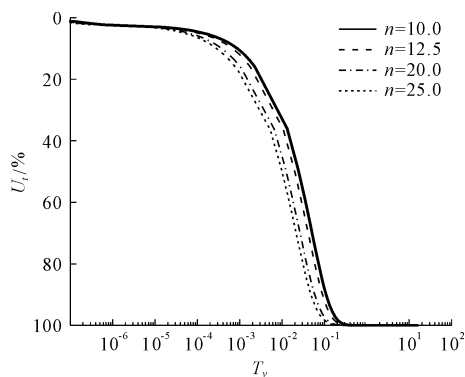


图 6 桩土模量比 n 对固结效率影响

由图 6 可知,碎石桩复合地基固结效率随桩土模量比 n 的增大而增大,且增大幅度变化较为平缓。表明在附加荷载作用于复合地基表面的过程中,作用于桩间土附加荷载逐渐转移至桩身,随桩土模量比的增大,该应力转移过程越快,导致桩土应力集中效应愈明显,在此过程中,桩间土在外荷载作用下压缩固结耗时越短,使得碎石桩复合地基整体固结效率提高。

3.3 桩土置换率

在对天然软土层进行地基预加固处理时,由于地基使用要求或标准不同,使得桩体平面布点间距及数量的不同,由此导致桩土置换率存在差异,而桩土置换率的不同亦对碎石桩复合地基的固结性状造成影响。基于此,设桩土置换率 $m = 2\pi (R_p/D)^2$, 其中 D 为桩点间距。研究桩土置换率 m 对碎石桩复合地基固结性状影响,得到不同 m 下碎石桩复合地基固结度 U_t 随时间因数 T_v 变化的对比结果如图 7 所示。

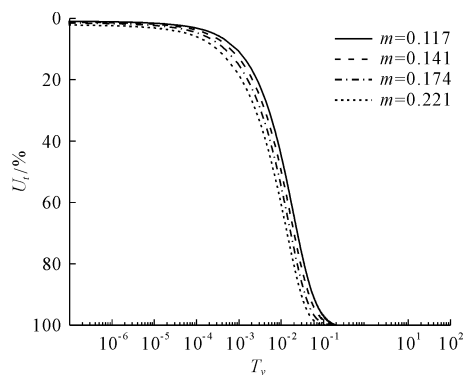


图 7 桩土置换率 m 对固结效率影响

由图可知,碎石桩复合地基固结效率随桩土置换率 m 的增大而增大,且增大幅度近似呈线性变化,在此变化过程中,桩间扰动土区域(涂抹区)面积比进一步增大,导致桩间土的整体竖向渗透系数

增加,有利于复合地基的固结效率的提高。同时桩土置换率的增大,亦使得复合地基的整体刚度提高,固结系数增大,固结效率提高,这与传统饱和土渗流固结理论相一致。

3.4 地基刚度比

天然地基因地域性不同而呈现成层性,上部多为近代沉积软黏土,而下部土层则多呈现为已完成自重固结的密实土。在采用碎石桩复合地基对上部软土进行处理的同时,桩端底下密实土的性质亦对复合地基的固结效率产生一定的影响。基于此,设地基刚度比 $p = E_{s2}/E_{s1}$, 研究地基刚度比 p 对碎石桩复合地基固结性状影响,得到不同 p 下碎石桩复合地基固结度 U_t 随时间因数 T_v 变化的对比结果如图 8 所示。

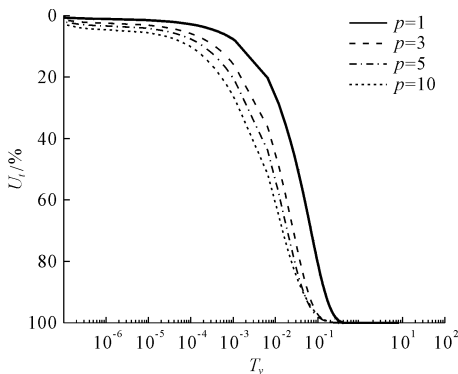


图 8 地基刚度比 p 对固结效率影响

由图可知,碎石桩复合地基固结效率随地基刚度比 p 的增大而增大,当 $p = 1$ 时,即不考虑复合地基的成层性,上下土层压缩模量一致。此时,该工况亦可与前述贯入比 $\lambda < 1$ 时相对应,复合地基固结效率最低。而当地基刚度比 p 大于 1 时,即 p 由 1 增大至 3 时,复合地基固结效率明显提高,且增幅最大,与后者相比,前者在随时间因数的增加过程中,其变化趋势更为平缓,变化曲线呈现出的曲率更小,固结周期明显更长。之后随地基刚度比 p 的增加,固结效率增幅近似呈线性变化。由此也进一步证明了桩端打穿上部软土层与否对碎石桩复合地基固结效率的影响。

4 规范法与数值法比较

规范在设计砂土桩、碎石桩等散体材料桩复合地基时,基于砂井地基排水固结采用 Terzaghi 一维固结理论进行固结度计算^[18]:

$$U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (5)$$

式中: U_h 及 U_v 分别为水平向及竖向固结度, $U_h =$

$1 - e^{-\frac{8C_h t}{F_n d_p^2}}$, $U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 C_v t}{4H^2}}$, C_h 、 C_v 分别为水平及竖向固结系数, $C = \frac{E_s k}{\gamma_w}$, k 为水平或竖向渗透系数, $F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$, n 为井径比, $n = d_e/d_w$, d_e 为碎石桩的有效排水直径, d_w 为桩身直径, H 为单面排水土层厚度或双面排水时土层厚度的一半, t 为固结时间。

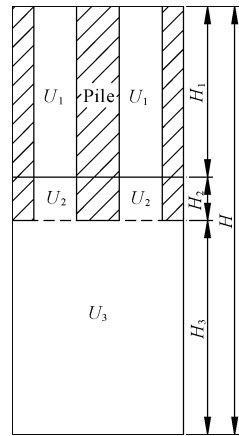


图 9 碎石桩复合地基计算简图

碎石桩复合地基计算简图如图 9 所示,依据地层刚度不同,将复合地基从上至下分为 3 段,对应地基固结度依次为 U_1 、 U_2 及 U_3 ,其中第一、二段考虑水平及竖向固结,第三段仅考虑竖向固结,计算得碎石桩复合地基平均固结度:

$$U_t = U_i \frac{H_i}{H} \quad (6)$$

式中, $i = 1 \sim 3$, $H = H_1 + H_2 + H_3$ 。

假定附加荷载瞬时加载于复合地基顶面,依据上式及前述参数计算得到碎石桩复合地基平均固结度,并与数值解答(初始条件下桩端贯入比 $\lambda = 1.2$) 对比如图 10 所示。

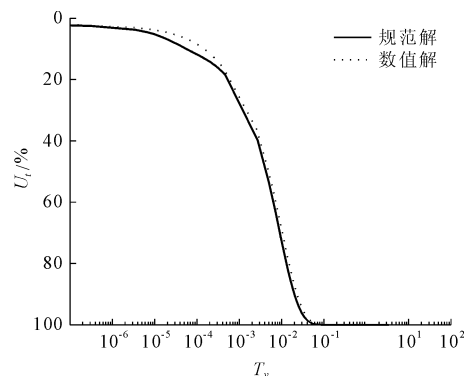


图 10 规范解与数值解对比

由图 10 可知,规范解整体上较数值解偏保守,具体表现为在加载初期,规范解与数值解存在局部较大差异,而后续固结过程中,两者差异小于 10%,而此差异原因可能在于数值方法在单元离散过程中存在一定的误差累计所致。

从整个固结度随时间因数的变化过程中来看,两种方法在变化趋势上基本一致,仅在固结度数值大小上存在较小差异,而在工程设计中,此种差异范围影响较小。从两种方法的对比结果上看,采用规范方法推荐的砂井地基固结理论计算结果与三维数值方法所得结果基本一致。故在进行碎石桩复合地基设计时,采用规范方法亦可得到足够精度的解答。

工程实践表明,强夯碎石桩成桩后的桩身断面往往呈现出中上部较大,下部较小的锥型。而鉴于文中两种方法的计算模型均对实际工程进行了一定的简化,后续可进一步建立较为真实的三维复合地基模型进行数值求解,而辅以规范方法进行初步设计。

5 结 论

采用有限元数值方法对碎石桩复合地基固结性状进行分析,结合工程实践,研究桩身贯入比、桩土模量比、桩土置换率及地基刚度比对碎石桩复合地基固结特性的影响,并在碎石桩复合地基固结计算上,将数值方法与规范法结果进行对比,得到以下结论:

(1) 碎石桩复合地基固结效率随桩身贯入比、桩土模量比、桩土置换率及地基刚度比的增大而增大。

(2) 桩身贯入比小于 1 或地基刚度比等于 1 时,碎石桩复合地基固结效率最慢。表明当桩端未打穿上部软土层时,最不利于复合地基的排水固结及后期工后沉降的减小。

(3) 当桩身贯入比大于 1 时,一味增大贯入比或桩土置换率,尽管有利于加快碎石桩复合地基的固结效率,减小工后沉降,但增幅并不大,同时亦使得工程造价显著增加,故需要综合考虑合理设计碎石桩的桩点平面布置及桩长。

(4) 在进行天然地基固结计算时,采用经典 Terzaghi 一维渗流计算结果较三维计算结果偏保守,但总体误差很小;碎石桩复合地基渗流固结计算时,采用规范方法亦可得到足够精度的解答。

参考文献:

[1] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146.

- [2] 曾华健,潘忱. 强夯碎石桩联合 CFG 桩复合地基处理效果[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):64-69.
- [3] 曾华健,伍翔飞,潘忱,等. 孔内强夯碎石桩在仓储地基处理中的应用[J]. 土工基础,2021,35(3):302-306.
- [4] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [5] 复合地基技术规范:GB/T 50783—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [6] 冯艳辉,王武刚. 碎石桩排水能力和井阻效应对复合地基孔压计算的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(3):90-93,114.
- [7] 卢萌盟. 复合地基固结解析理论研究方法与进展[J]. 地基处理,2020,2(6):451-460.
- [8] Lu M M, Sloan S W, Indraratna B, et al. A new analytical model for consolidation with multiple vertical drains[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2016,40(11):1623-1640.
- [9] Lu M M, Jing H W, Zhou Y, et al. General analytical model for consolidation of stone column-reinforced ground and combined composite ground[J]. International Journal of Geomechanics,2016:04016131.
- [10] 徐超,朱顺然. 变井阻条件下碎石桩复合地基固结解析解[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(9):1320-1325,1354.
- [11] 王双,王睿,杨彪,等. 变荷载作用下碎石桩复合地基固结简化分析[J]. 岩土力学,2015,36(1):34-40.
- [12] 郭彪,龚晓南,李亚军. 考虑加载过程及桩体固结变形的碎石桩复合地基固结解析解[J]. 工程地质学报,2016,24(3):409-417.
- [13] 郭彪,龚晓南,李亚军. 考虑桩体径竖向渗流的碎石桩复合地基固结解析解[J]. 岩土工程学报,2017,39(8):1485-1492.
- [14] 翁嘉蔚,杨涛. 路堤荷载下短混凝土芯碎石桩复合地基的固结特性[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):111-116.
- [15] 孙举,谢新宇,谢康和. 双层散体材料桩复合地基固结理论[J]. 岩土力学,2008(2):321-326.
- [16] Jiang Y, Han J, Zheng G. Numerical analysis of consolidation of soft soils fully-penetrated by deep-mixed columns[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2013,17(1):96-105.
- [17] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [18] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.