

路堤荷载下碎石桩复合地基沉降分析

邹新军, 黄立, 廖连海

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 基于路堤荷载下碎石桩复合地基的竖向与径向变形特征, 采用更为合适的桩周竖向位移模式与径向位移模式, 推导出桩侧摩阻力分布的解析解, 然后通过典型单元体的受力分析, 给出一种路堤荷载下碎石桩复合地基加固区压缩变形的分析计算方法。该方法不仅能反映出桩间土的相互作用和桩侧摩阻力分布存在中性点的特性, 而且考虑了桩体鼓胀变形对复合地基沉降的影响。最后, 结合工程实例的对比分析结果表明, 本文方法计算结果相比复合模量法及不考虑桩体鼓胀变形的的方法更接近实测值, 表明了本文方法的合理与可行性。

关键词: 复合地基; 碎石桩; 路堤荷载; 鼓胀变形; 沉降

中图分类号: TU433; TU472.3*5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)05-0064-06

碎石桩复合地基技术在高速公路软弱地基处置中正被广泛应用。但直至目前, 如何准确分析计算路堤荷载下碎石桩复合地基的沉降仍是难点。一般的复合地基沉降计算方法认为复合地基的沉降量为下卧层沉降量和加固区压缩量之和^[1]。下卧层沉降量通常采用分层总和法来计算, 而加固区压缩量计算方法则有桩身压缩量法、应力修正法和复合模量法。目前复合模量法使用最为普遍^[2-3]。然而, 此方法用于计算碎石桩复合地基沉降仍存在一定缺陷。首先, 该方法并未考虑桩体的径向变形, 大量工程实践表明, 碎石桩在受力过程中存在比较明显的侧向鼓胀变形。其次, 复合模量法实质是单向压缩分层总和法^[4], 是基于桩土竖向等应变条件下推导的结果, 而实际工程中碎石桩以及下卧层均具有一定的压缩性, 同时, 正负摩阻力(转换点即中性点)的产生分别使桩顶向上刺入垫层和桩底向下刺入下卧层, 产生桩土相对滑移, 此时桩土竖向等应变这一假定不再成立。当然有限元法也是研究碎石桩复合地基沉降的一种新方法^[6-7], 可考虑较为复杂的荷载条件和桩土性质, 但此方法分析过程比较复杂, 不易为一般工程技术人员所掌握, 故深入研究适应于碎石桩复合地基沉降求解的新方法显得尤为重要。

为此, 本文基于已有理论与试验研究工作^[8-9], 通

过采用更为合适的桩周土竖向与径向位移模式, 考虑桩-土相互作用和碎石桩的鼓胀变形与桩侧摩阻力分布存在中性点的特性, 以期获得路堤荷载下碎石桩复合地基桩侧摩阻力、桩身正应力以及桩周土体附加应力分布的解析解。在此基础上, 引入边界条件, 进一步探讨桩身压缩量以及加固区土体压缩量的简化计算公式, 并给出相应计算参数的确定方法, 以便类似工程参考。

1 典型单元体的位移模式

一般认为, 路堤荷载下碎石桩复合地基沉降由加固区和下卧区压缩变形组成, 其可表示为:

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

式中: w_s ——复合地基总沉降量;

w_{s1} ——加固区土体压缩变形量;

w_{s2} ——下卧层土体压缩变形量。

由于下卧层压缩变形量的计算已有比较成熟的分析计算方法^[10], 因此, 加固区土体压缩变形分析是路堤荷载下碎石桩复合地基沉降分析的重点, 也是本文探讨的主要内容。

如图 1 所示, 取单桩及其影响范围内土体为碎石桩复合地基沉降分析研究对象, 令桩径为 $2a$, 则由桩间距和布桩方式可得单桩影响范围直径 d_e ^[11]:

$$d_e = C_g S_d = 2b \quad (2)$$

式中: C_g ——布桩方式影响系数(等边三角形布桩时取 1.05, 正方形布桩时取 1.13);

S_d ——桩间中心距。

分析典型单元体时做如下几个假定:

(1) 桩体和土体都是均质各向同性线弹性体;

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51378197); 湖南省交通科技项目(200815)

作者简介: 邹新军(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事桩基础及软土地基处理研究。

E-mail: xjzouhd@hnu.edu.cn

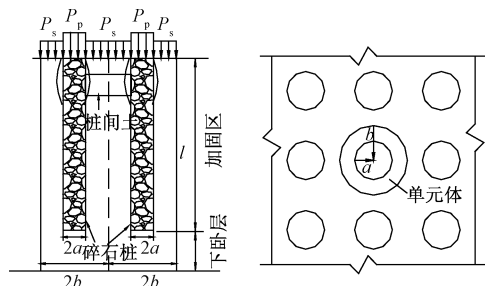


图1 碎石桩复合地基沉降分析模型

Fig.1 Settlement analysis model for gravel pile composite ground

(2) 竖向荷载作用下,典型单元体外侧边界上的径向位移和剪应力均为零;

(3) 忽略群桩效应对单元体受力特性的影响。

杨涛^[11]建议的典型单元体竖向位移模式:

$$w_s(r, z) = w_p(z) + \alpha_c \left(\frac{r}{a} - e^{\beta_c \left(\frac{r}{a} - 1 \right)} \right) \left(1 - \frac{z}{z_m} \right) \quad (3)$$

式中: α_c 和 β_c ——待定系数;

$w_s(r, z)$ ——点 (r, z) 处桩周土体的竖向位移;

$w_p(z)$ —— z 深度处桩体的竖向位移。

由于路堤荷载下碎石桩复合地基在桩顶和桩端分别发生向上刺入和向下刺入,并因此产生正负摩阻力。式(3)能反映出这种变形特征,具有一定的合理性。但是按照该位移模式,桩侧的摩阻力沿桩长呈直线分布。李海芳^[8]考虑到由于桩的上下刺入,其上下两端的侧摩阻力有可能达到其极限值,建议采用以下位移模式:

$$w_p(r, z) = w_p(z) \left(1 + \alpha_c \left(\frac{r}{a} - e^{\beta_c \left(\frac{r}{a} - 1 \right)} \right) \right) \quad (4)$$

这也是本文采用的典型单元体竖向位移模式。

桩周土径向位移模式可采用 Randolph^[9] 等人建立的经过数值模拟及现场实测试验验证的碎石桩体在竖向荷载作用下的径向变形位移模式:

$$u_s(r, z) = u_p(z) (c_2 r^2 + c_1 r + c_0) \quad (5)$$

$$a \leq r \leq b$$

式中: $u_s(r, z)$ ——点 (r, z) 处桩周土径向位移;

$u_p(z)$ —— z 深度桩土边界处径向位移;

c_2, c_1 与 c_0 ——待定系数。

根据边界条件:

(1) 桩体边缘处桩周土与桩体径向位移协调,即

$$u_s(a, z) = u_p(z);$$

(2) 由对称性可知单元体外表面处无径向位移,即 $u_s(b, z) = 0$;

(3) 土体径向位移在单元体外边缘处随 r 的变化

率为零即: $\frac{\partial u_s(r, z)}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0$;

可求得待定系数并得到桩周土径向位移函数:

$$u_s(r, z) = u_p(z) \frac{(r-b)^2}{(a-b)^2} \quad (6)$$

式(4)和式(6)即为本文采用的桩周土的竖向与径向位移模式。

2 加固区压缩变形分析

2.1 桩侧摩阻力和桩体压缩量

由桩周土竖向与径向位移模式得到桩周土剪应力:

$$\tau_s(r, z) = \gamma_{rz} G_s = G_s \left[\frac{\partial w_s(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial u_s(r, z)}{\partial z} \right] \quad (7)$$

式中: $\tau_s(r, z)$ ——桩周土体剪应力;

G_s ——土体剪切模量。

桩身单元受力模型如图2所示。

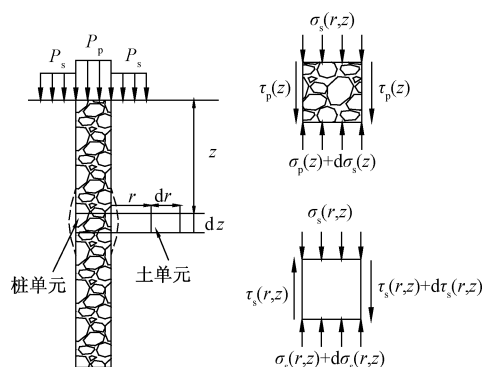


图2 桩体单元及桩间土竖向受力模型

Fig.2 Vertical loading model on a pile and its surrounding soil unit

根据桩体单元竖图2。向受力平衡,可得:

$$\frac{d\sigma_p(z)}{dz} = \frac{2\tau_p(z)}{a} \quad (8)$$

对上式积分可得:

$$\tau_p(z) = -\frac{aE_p}{2} w_p''(z) \quad (9)$$

式中: E_p ——桩体压缩模量。

将竖向位移模式对 r 求导可得:

$$\frac{\partial w_s(r, z)}{\partial r} = w_p(z) \frac{\alpha_c}{a} (1 - \beta_c e^{\beta_c \left(\frac{r}{a} - 1 \right)}) \quad (10)$$

由于桩土接触面上桩体的径向位移可看成是桩体受到水平方向压应力 $k_0 \sigma_s(z)$ (k_0 为静止侧压力系数, $\sigma_s(z)$ 为深度 z 处土体平均竖向应力) 所产生的径向位移与桩体轴向应力 $\sigma_p(z)$ 所产生的径向位移的代数

和^[12],而前者可由弹性力学圆环或圆筒受均布压力下的应力解答而得到^[13],由此可得到桩土接触面上径向位移:

$$u_p(z) = \frac{a}{E'_p} [\mu_p \sigma_p(z) - k_0 \sigma_s(z) (1 - \mu_p)] \quad (11)$$

$$\text{其中: } E_p = 1 - \frac{2\mu_p^2}{1 - \mu_p} E_p = \beta E_p \quad (12)$$

$$\sigma_s(z) = p_s - \frac{C}{A_s} \int_0^z \tau_s(a, z) dz = p_s - \frac{C}{A_s} \int_0^z \tau_p(z) dz \quad (13)$$

式中: E'_p ——桩体弹性模量;

μ_p ——桩体泊松比;

C ——桩体周长, $C = 2\pi a$;

A_s ——单元体中桩周土面积, $A_s = \pi(b^2 - a^2)$ 。

联立式(6)、(9)、(11)、(12)和(13)可得:

$$\frac{\partial u_s(r, z)}{\partial z} = w'_p(z) \left[\frac{2a\mu_p A_s + a^2(1 - \mu_p)k_0 C}{2\beta A_s} \right] \frac{(r - b)^2}{(a - b)^2} \quad (14)$$

将式(10)和式(14)代入式(7),且令 $r = a$ 并整理得:

$$w''_p(z) = \frac{2\beta A_s G_s \alpha_c (1 - \beta_c)}{a^2 E_p A_s \beta + 2a^2 \mu_p A_s G_s + a^3 (1 - \mu_p) k_0 C G_s} w_p(z) \quad (15)$$

$$\text{令: } \frac{2\beta A_s G_s \alpha_c (1 - \beta_c)}{a^3 (1 - \mu_p) k_0 C G_s + a^2 E_p A_s \beta + 2a^2 \mu_p A_s G_s} = D^2 \quad (16)$$

则可知式(16)为二阶线性齐次微分方程,解得其通解为:

$$w_p(z) = C_1 e^{D(z-z_m)} + C_2 e^{-D(z-z_m)} \quad (17)$$

据桩顶处桩体附加应力 p_p 以及中性点 z_m 处桩侧摩阻力 $\tau_p(z_m)$ 的协调条件: $\sigma_p(0) = p_p$; $\tau_p(z_m) = 0$, 则可求得待定系数 C_1 和 C_2 :

$$C_1 = -C_2 = \frac{p_p}{DE_p(e^{Dz_m} + e^{-Dz_m})} \quad (18)$$

联立式(9)和式(17)即可得到桩侧摩阻力的分布:

$$\tau_p(z) = \frac{-aD^2 E_p C_1}{2} (e^{D(z-z_m)} - e^{-D(z-z_m)}) \quad (19)$$

对式(8)积分并注意到 $\sigma_p(0) = p_p$ 则可得到桩身正应力分布:

$$\sigma_p(z) = 1.25 p_p - \frac{DE_p C_1}{4} (e^{D(z-z_m)} + e^{-D(z-z_m)}) \quad (20)$$

联立式(7)、式(10)、式(14)、式(17)即可得桩周

土剪应力分布为:

$$\tau_s(r, z) = G_s w_p(z) \left[\frac{\alpha_c}{a} (1 - \beta_c e^{\beta_c (\frac{r}{a} - 1)}) + B_1 (r - b)^2 \right] \quad (21)$$

$$\text{式中: } B_1 = \frac{aD^2 [2\mu_p A_s + a(1 - \mu_p)k_0 C]}{2\beta A_s (a - b)^2} \quad (22)$$

将桩身正应力 $\sigma_p(z)$ 除以桩身压缩模量 E_p 并积分即可得加固区桩身压缩量为:

$$\begin{aligned} w_p &= \int_0^l \frac{\sigma_p(z)}{E_p} dz = \int_0^l w'_p(z) dz \\ &= C_1 (e^{D(z-z_m)} - e^{D(z-z_m)}) \Big|_0^l \\ &= C_1 [e^{-Dz_m} (e^{Dl} - 1) - e^{Dz_m} (e^{-Dl} - 1)] \end{aligned} \quad (23)$$

2.2 加固区桩间土应力和压缩量

在图2中取桩间土土体单元,根据竖向受力平衡条件,可得到:

$$\begin{aligned} 2\pi r \tau_s(r, z) dz - 2\pi(r + dr) [\tau_s(r, z) + d\tau_s(r, z)] dz + \\ [\sigma_s(r, z) + d\sigma_s(r, z)] [\pi(r + dr)^2 - \pi r^2] - \sigma_s(r, z) [\pi(r + dr)^2 - \pi r^2] = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

化简可得:

$$\frac{\partial \sigma_s(r, z)}{\partial z} = \frac{\tau_s(r, z)}{r} + \frac{\partial \tau_s(r, z)}{\partial r} \quad (25)$$

联立式(21)与式(25)可得到桩周土附加应力分布为:

$$\begin{aligned} \sigma_s(r, z) &= \int \frac{\partial \sigma_s(r, z)}{\partial z} dz \\ &= [C_1 e^{D(z-z_m)} - C_2 e^{-D(z-z_m)}] f(r) + C \end{aligned} \quad (26)$$

式中: C ——待定系数。

$$\begin{aligned} f(r) &= \frac{\alpha_c G_s}{aD} \left(\frac{1}{r} - \frac{\beta_c}{r} e^{\beta_c (\frac{r}{a} - 1)} - \frac{\beta_c^2}{a} e^{\beta_c (\frac{r}{a} - 1)} \right) \\ &+ B_2 \frac{(3r^2 - 4rb + b^2)}{r} \end{aligned} \quad (27)$$

$$B_2 = \frac{aDG_s [2\mu_p A_s + a(1 - \mu_p)k_0 C]}{2\beta A_s (a - b)^2} \quad (28)$$

由式(13)可知: $\sigma_s(0) = p_s$, 则可知:

$$C = p_s - f(r) (C_1 e^{-Dz_m} - C_2 e^{Dz_m}) = p_s - f(r) \frac{p_p}{DE_p} \quad (29)$$

将桩周土剪应力 $\sigma_s(r, z)$ 除以土体压缩模量 E_s 并积分可得加固区土体压缩量:

$$w_{sr} = \int_0^l \frac{\sigma_s(r, z)}{E_s} dz = \frac{f(l)}{E_s} f(r) + \frac{p_s l}{E_s} \quad (30)$$

$$f(l) = \frac{C_1}{D} [e^{-Dz_m} (e^{Dl} - 1) - e^{Dz_m} (e^{-Dl} - 1)] - \frac{p_p l}{DE_p} \quad (31)$$

2.3 碎石桩复合地基桩土应力比

由于假设桩土界面处桩土位移相等,当 $r = a$ 时, $w_p = w_{s1}$,则由式(23)和式(30)可得:

$$n = \frac{p_p}{p_s} = D^2 E_p l (e^{Dz_m} + e^{-Dz_m}) \{ [E_s D - f(a)] \times [e^{-Dz_m}(e^{Dl} - 1) - e^{Dz_m}(e^{-Dl} - 1)] + Dlf(a)(e^{Dz_m} + e^{-Dz_m}) \}^{-1}$$
 (32)

由复合地基表面受力平衡,可得:

$$p = mp_p + (1 - m)p_s$$
 (33)

式中: p ——复合地基表面荷载集度;

m ——置换率。

3 分析计算参数的确定

上文已导出了碎石桩复合地基沉降的分析计算公式,用其计算碎石桩复合地基沉降前,必须先确定分析模型中桩土应力比 n 、地基表面桩体附加应力 p_p 、地基表面土体附加应力 p_s 、待定系数 D 、竖向位移模式中待定系数 α_c 、 β_c 和中性点 z_m 这 7 个非常规分析参数,以下是该 7 个参数的确定方法。

3.1 中性点 z_m 的确定

Poorooshasb^[14] 用简化的数值方法研究了刚性桩和柔性桩在填土荷载作用下桩侧的负摩阻力,发现荷载大小对中性点的位置影响很小,可以忽略不计。因此,可按规范估算,取: $z_m = (0.5 \sim 0.6)l$ 。

3.2 β_c 值的确定

因典型单元体外侧面上剪应力为零,故将 $r = b$ 代入式(21)可得:

$$\beta_c e^{\beta_c (\frac{b}{a} - 1)} = 1$$
 (34)

式中,对给定的 a 和 b ,通过求解方程可得唯一的 β_c 。

3.3 其他参数的确定

假设桩顶处桩侧摩阻力达到了其极限值的某一水平,即当 $z = 0$ 时, $\tau_p(0) = -\tau_f$ 则由式(19)可知:

$$D = \frac{2\tau_f(e^{Dz_m} + e^{-Dz_m})}{ap_p(e^{Dz_m} - e^{-Dz_m})}$$
 (35)

n 、 p_p 、 p_s 、 D 和 α_c 可按以下步骤逐步逼近求解:

- (1) 假设一个 p_p ,代入式(35)得到 D ;
- (2) 将求得的 D 和 β_c 代入式(17)可求得 α_c ;
- (3) 将 D 、 β_c 和 α_c 代入式(32)求得桩土应力比 n ;
- (4) 将 $p_p = np_s$ 代入式(33)求得 p_p 和 p_s ;
- (5) 将求得的 p_p 代入式(35)求得新一轮的 D ;
- (6) 重复步骤(2)、(3)、(4)和(5),直至最后两

次求得的 p_p 之差在允许误差范围内。

4 工程实例分析

以文献资料[15]为例,该工程北京至珠海国道主干线新乡至郑州高速公路 K55 + 700 ~ K58 + 000 段,采用碎石桩加固软土地基。地基表面平均荷载集度为 194.24kPa,典型单元体半径 $b = 0.25\text{m}$,桩间距 $S_d = 1.3\text{m}$ (正方形布桩),桩体压缩模量 $E_p = 100\text{MPa}$,土体加权平均压缩变形模量 $E_s = 5.5\text{MPa}$,桩长 $l = 13\text{m}$, $k_0 = 0.4$, $\mu_p = 0.35$, $\mu_s = 0.4$ 。取碎石桩中性点位置 $z_m = 0.55l$,不排水抗剪强度 $\tau_f = 40\text{kPa}$ 。

采用本文分析方法,由式(38)求得 $\beta_c = 0.432$,再由上文中的步骤可分别求得 $D = 0.592$, $\alpha_c = 0.959$, $n = 3.632$, $p_p = 540.645\text{kPa}$, $p_s = 148.851\text{kPa}$,最后由各参数求得桩间土压缩量 $w_{s1} = 42.9\text{cm}$,下卧层压缩量 $w_{s2} = 10.4\text{cm}$ 。因此,复合地基总沉降 $w_s = 53.3\text{cm}$ 。其他结果见表 1。

表 1 复合地基压缩变形量计算结果
Table 1 Compressive deformations of the composite ground

计算方法	复合模量法	文献[8]	文献[13]	本文结果	实测 ^[16]
压缩量 (cm)	40.5	45.1	54.7	53.3	54.0

为了便于对比,本文用有限元软件 ANSYS 对该实例做了数值模拟,假设碎石桩桩体与土体都属于理想弹塑性材料并且遵循摩尔-库仑屈服准则,以此建立分析模型,计算宽度取 10 倍桩径,计算深度取 2 倍桩长,粘聚力 $c = 25.6\text{kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 26^\circ$,其他参数不变,得到桩侧摩阻力与桩身正应力分布的有限元结果如图 3、图 4 所示。

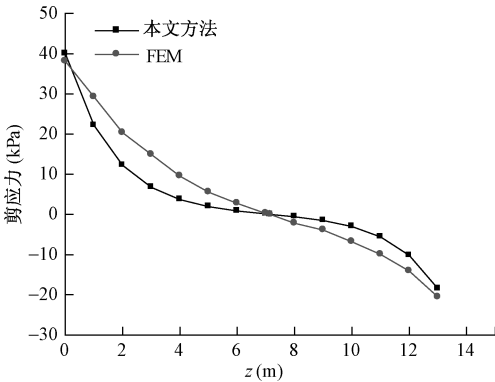


图 3 桩侧摩阻力分布(负号表示摩阻力向上)
Fig.3 Shear stress distribution of pile side
(the minus sign indicates the friction upwards)

- (1) 从表 1 中计算结果可知,由于复合模量法高

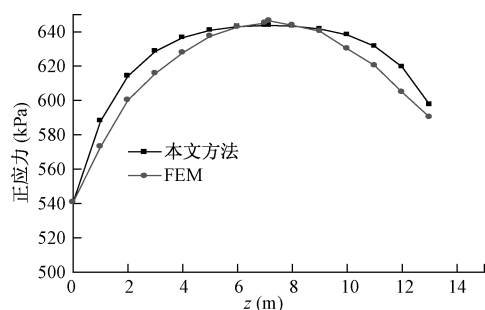


图4 桩身正应力分布

Fig.4 Stress distribution in pile

估了桩体作用,而文献[8]方法未能考虑碎石桩的径向变形,导致其计算结果均偏小。文献[13]考虑了桩体径向变形,但由于未考虑中性点影响,且因为考虑了桩土相对滑移,故导致其计算结果高于实测值。而本文方法与实测值更为接近,相对误差约 1.30%,对实际工程具有一定指导意义。

(2) 图3、图4给出了桩侧摩阻力以及桩身正应力的分布规律,其中 FEM 表示有限元结果。由图可以看出,采用本文方法得到的桩侧摩阻力与桩身正应力的分布与有限元结果比较吻合,说明对桩侧摩阻力分布存在中性点的分析是正确的,表明了本文方法的合理性与可行性。

5 结论

(1) 考虑桩-土相互作用和碎石桩桩体鼓胀变形特性,确定出适合于碎石桩复合地基的桩周土竖向与径向位移模式。

(2) 基于给出的桩周土竖向与径向位移模式,推导出路堤荷载下碎石桩复合地基桩侧摩阻力分布的解析解及加固区压缩变形的简化计算公式,并给出了相应计算参数的确定方法。

(3) 结合工程实例的文献对比分析结果表明,本文方法的计算结果更接近实测值,可为工程设计提供参考。

(4) 由于本文方法的位移模式考虑了桩的上、下刺入变形,假设桩体通长产生摩阻力,因此,对于刚性基础下无柔性褥垫层的碎石桩复合地基或者碎石桩桩体过长的情况不再适用。

参考文献:

[1] 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. [GONG X N. Theory of composite foundation and engineering application

[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)]

[2] 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.

[3] JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [JGJ 79-2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]

[4] 林耘生, 林鲁生, 刘祖德. 复合模量法计算碎石桩复合地基沉降[J]. 土工基础, 2007, 21(3): 57-59. [LIN Y S, LIN L S, LIU Z D. Study on macadam pile composite foundation settlement calculation using composite modulus method[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(3): 57-59. (in Chinese)]

[5] 赵明华, 杨明辉, 吴亚中, 等. 土工格室+碎石桩复合地基承载机理及其试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 6-9. [ZHAO M H, YANG M H, WU Y Z, et al. Study on the Capacity Mechanism and Model Test of Geogrid Mattress and Gravel Pile Composite Foundation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 6-9. (in Chinese)]

[6] 刘义怀, 朱志铎, 刘松玉. 路堤荷载下碎石桩复合地基的有限元分析[J]. 公路交通科技, 2002, 19(5): 11-13. [LIU Y H, ZHU Z D, LIU S Y. Finite element method for composite foundation with stone columns [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(5): 11-13. (in Chinese)]

[7] 张庆松, 刘松玉, 李术才. 粉喷桩复合地基沉降的数值模拟研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11): 15-18. [ZHANG Q S, LIU S Y, LI S C. Numerical Simulation Study on Settlement of Dry Mixing Pile Composite Foundation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(11): 15-18. (in Chinese)]

[8] 李海芳, 温晓贵, 龚晓南. 路堤荷载下复合地基加固区压缩量的解析算法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 77-80. [LI H F, WEN X G, GONG X N. Analytical function for compressive deformation of stabilized layer in composite foundation under load of embankment [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(3): 77-80. (in Chinese)]

- [9] Randolph M F, Worth C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(12): 1465 – 1488.
- [10] 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. [GB 50007 – 2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)]
- [11] 杨涛. 复合地基沉降计算理论、位移反分析模型和二灰土桩软基加固试验研究[D]. 南京: 河海大学, 1997. [YANG T. Settlement calculation theory, displacement backanalysis model of composite ground and test research of improved soft soil by flyash-lime-soil pile[D]. Nanjing: Hohai University, 1997. (in Chinese)]
- [12] 曹文贵, 杨泽华. 考虑桩土滑移和鼓胀影响的碎石桩复合地基沉降分析方法[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 42 – 48. [CAO W G, YANG Z H. A study of settlement calculation of the gravel pile composite ground considering the influence of slip between pile and soil as well as lateral displacement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 42 – 48. (in Chinese)]
- [13] 徐芝纶. 弹性力学简明教程(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. [XU Z L. A concise course in elasticity (The third edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)]
- [14] Poorooshasb H B, Alamgir M, Miura N. Negative skin friction on rigid and deformable piles [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(2): 109 – 126.
- [15] 何红霞. 高速公路软弱土地基加固处治技术研究及工程应用[D]. 南京: 东南大学, 2003. [HE H X. The technology research and engineering application of reinforcement for highway above soft soil ground [D]. Nanjing: Southeast University, 2003. (in Chinese)]

Settlement calculation of gravel pile composite ground under embankment loads

ZOU Xin-jun, HUANG Li, LIAO Lian-hai

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

Abstract: Based on the vertical and radial deformation behavior of gravel pile composite ground under embankment loads, more reasonable vertical displacement and radial deformation of the soil surrounding the pile shaft are presented to deduce the analytic solutions for the side resistance along the pile-soil interface. By analyzing the stress distribution of a typical pile element, a method to calculate the compression deformation of the reinforced area in gravel pile composite ground under embankment loads is developed. Considering the effects of bulging deformation of the pile shaft on the settlement of composite ground, the advised method can simulate the neutral points of interaction between the pile-soil and the friction on the pile-soil interface. Combined with an engineering example, a comparative analysis shows that the calculated result with the method in this paper are closer to the measured settlement than those with other available methods, such as the composite modulus method or the method without considering the bulging deformation of pile shaft. The results can be used for reference in engineering practice.

Key words: composite ground; gravel pile; embankment load; bulging deformation; settlement

责任编辑: 张明霞