带垫层的砼芯水泥土搅拌桩复合地基桩 - 土应力比的计算

吴汉波　王星华　但汉成　王　峰
(中南大学土木工程与建筑学院)

摘　要　在考虑了砼芯水泥土搅拌桩桩顶刺入垫层,桩端刺入下卧层,桩周存在的负摩阻力的情况下,导出了带垫层的砼芯水泥土搅拌桩复合地基桩 - 土应力比的计算公式,并对不同桩深的桩 - 土应力比也做了推导。最后通过实例验证,结果显示本文所提出的桩土应力比计算方法与实测具有很好的一致性。

关键词　桩 - 土应力比　带垫层砼芯水泥土搅拌桩复合地基　垫层　负摩阻力

砼芯水泥土搅拌桩复合地基是在水泥土搅拌桩中用静压法插入小直径预制混凝土桩而形成的复合地基。砼芯水泥土搅拌桩复合地基是介于桩基础和天然地基之间的一种地基加固形式,由于垫层的设置砼芯水泥土搅拌桩会有向上刺入垫层的变形。同时,也会刺入下卧层,使得承载性状很复杂。

目前国内对于砼芯水泥土搅拌桩桩土应力比的研究,是在假设桩顶无刺入垫层的基础上提出的,一般认为桩土应力比在 100～600之间,并因此认为砼芯水泥土搅拌桩基础的上部荷载基本上由桩身承担,土体所分担的荷载可忽略不计,设计时按纯桩基考虑[1]。显然这与实际并不完全相符。有鉴于此,本文对砼芯水泥土搅拌桩复合地基桩 - 土应力比的计算方法进行分析推导和求解。

1　桩 - 土应力比

桩 - 土应力比(n)是指复合地基中桩顶上的平均应力和桩间土上的平均应力的比值[2]。在桩 - 土复合地基中,设计的基本原则是使桩体和桩间土能最大限度地发挥承载作用。桩 - 土应力比是反映复合地基工作性状的一个重要参数,影响桩土应力比的因素很多,如荷载水平,桩土相对刚度,置换率等是桩土应力比的主要影响因素,另外还与受荷时间有关. 桩土应力比要准确计算是困难的,因此结合工程找到适宜的简化计算公式是有价值的。

2　计算模型的建立

2. 1　基本假定

砼芯水泥土搅拌桩的承载特性与刚性单桩类似,有别于柔性桩,所以其桩土应力比的计算也应与刚性桩类似。桩 - 土 - 垫层的共同作用非常复杂,本文在此认识的基础上提出模型基本假定:

(1) 假定砼芯水泥土搅拌桩 - 土均为各向同性线弹性体;

(2) 砼芯搅拌桩视为一刚性整体,其复合模量通过加权平均的方法[1]得到,忽略其轴向变形;

(3) 等效单元体侧面剪力和法向位移等于零,桩体的径向变形忽略不计;

(4) 设桩 - 土变形很小,桩 - 土界面处桩 - 土位移协调,不产生相对滑移;

(5) 垫层 - 桩 - 桩间土的界面力学性能可用"压力 =刚度系数 ×变形"的公式表示;

(6) 桩侧摩阻力采用 Bernum公式计算,加固区内桩侧摩阻力分布形式整体为非线性。

2. 2　模型示意图

如图 1所示的复合地基,桩长 L,桩的直径为 $d=2a$,单桩加固范围直径 $d_e=2b$,直径 d_e可以由桩的间距和布桩方式按 $d_e=c_g \cdot S_d$确定。式中:S_d为桩间距;采用三角形布桩时 $c_g=1.05$,正方形布桩时 $c_g=1.13$文献[3]。

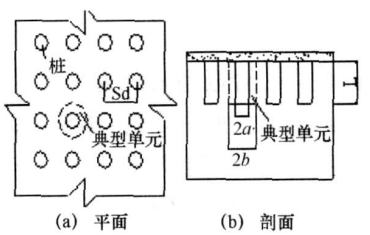


图 1　群桩复合地基

收稿日期〕 2007 - 04 - 20

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 变形协调方程的建立及求解

3.1 变形协调方程的建立

取等效单元体进行分析,由竖向应力平衡可得:

$$\sigma = \frac{(M + n)}{(1 + M)} \cdot \sigma_s \qquad (1)$$

其中 σ—地基上的外荷载在单元体表面的应力,σ_p,σ_s—分别为单元体桩 - 土表面应力。n—为桩土应力比,M 为等效单元体中桩侧土体与桩体得面积之比 $M = A_s / A_p$。

设均布荷载经过褥垫层的调整之后,假设作用于桩体顶面应力为 σ_{p0},作用于桩间土体顶面应力为 σ_{s0}。在图 2,3上取纵断面 1 - 1与纵断面 2 - 2进行变形分析,以建立两者之间的变形协调方程。等沉面以上纵断面 2 - 2的桩间土的压缩变形量与等沉面以下纵断面 2 - 2的桩间土的压缩变形量之和应等于等沉面以上纵断面 1 - 1的桩体上刺入褥垫层的刺入量与等沉面以下纵断面 1 - 1的桩体下刺入褥垫层的刺入量之和(刚性桩体压缩变形量忽略不计),即:

$$\begin{aligned} \int_0^{L_0} \varepsilon_{su}(z)\,dz &= \int_0^{L_0} \varepsilon_{pu}(z)\,dz + S_{上刺} \\ \int_{L_0}^{L} \varepsilon_{sd}(z)\,dz &= \int_{L_0}^{L} \varepsilon_{pd}(z)\,dz + S_{下刺} \end{aligned} \qquad (2)$$

式中:$\varepsilon_{su}(z)$,$\varepsilon_{sd}(z)$分别为等沉面以上、以下的桩间土的竖向应变;$\varepsilon_{pu}(z)$,$\varepsilon_{pd}(z)$分别为等沉面上、下桩体的轴向应变;$S_{上刺}$,$S_{下刺}$ 分别为桩体上刺褥垫层的变形量和下刺入持力层的变形量。

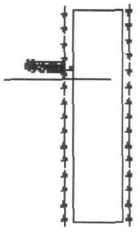


图 2 桩侧摩阻力分布

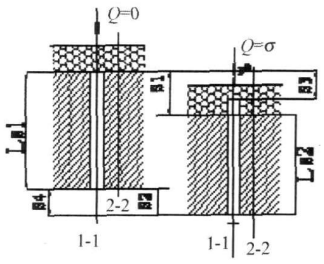


图 3 模型示意图

3.2 变形协调方程的求解

3.2.1 加固区等沉面以上的桩、土受力分析(以桩顶处为坐标原点)

(1) 等沉面以上的土体受力情况如图 4所示。令 $\tau_u(z) = K_{ou} \cdot \tan\phi_u \cdot \sigma_s(z)$根据单元受力平衡有:

$$\frac{d\sigma_s}{dz} + \frac{\pi d}{A_s} \cdot K_{0u} \cdot \tan\phi_u \cdot \sigma_s(z) = 0 \qquad (3)$$

式中:K_{0u},ϕ_u 为加固区等沉面以上土体静止侧压力系数和内摩擦角。令:$\frac{\pi d}{A_s} \cdot K_{0u} \cdot \tan\phi_u = \lambda_1$,即得到单元体的平衡微分方程:

$$\frac{d\sigma_s}{dz} + \lambda_1 \cdot \sigma_s(z) = 0 \qquad (4)$$

解之得:

$$\sigma_s(z) = \sigma_{s0} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot z} \qquad (5)$$

其中:σ_{s0}为桩顶($z = 0$)平面土体的应力。根据上面所得可求得等沉面以上的桩间土的压缩量:

$$S_u = \int_0^{L_0} \frac{\sigma_s(z)}{E_{su}} \cdot dz = \frac{\sigma_{s0}}{E_{su} \cdot \lambda_1}(1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0}) \qquad (6)$$

(2) 等沉面以上桩体受力情况如图 5所示。

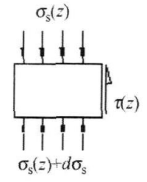


图 4 等沉面以上土体受力情况

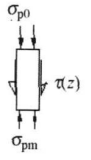


图 5 等沉面以上桩体受力情况

根据单元受力平衡有

$$\sigma_{pm} = \sigma_{p0} + \frac{\pi d}{A_p} A_s K_{0u} \tan\phi_u \int_0^{L_0} \sigma_s(z)\,dz \qquad (7)$$

其中:σ_{p0}为桩顶应力,σ_{pm}为等沉面处的桩体应力。继续化简并将式(5)代入可得:

$$\sigma_{pm} = \sigma_{p0} + M \cdot \lambda_1 \cdot \sigma_{s0} \int_0^{L_0} e^{-\lambda_1 \cdot z} \cdot dz \qquad (8)$$

解得等沉面处的桩体应力:

$$\sigma_{pm} = \sigma_{p0} + M \cdot \sigma_{s0}(1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0}) \qquad (9)$$

根据式(5)可以得到:当 $z = L_0$ 时的桩间土体应力为:

$$\sigma_{sm}(z) = \sigma_{s0} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot L_0} \qquad (10)$$

(3) 桩顶上刺的变形量可以求得为:

$$S_{上刺} = C_u \cdot (\sigma_{p0} - \sigma_{s0}) \qquad (11)$$

其中 C_u—为桩体顶面作用于垫层单位压力时的竖向刺入变形量(m /MPa)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2.2　加固区等沉面以下的桩、土受力分析 (以等沉面处为坐标原点)

同理可求得等沉面以下桩间土体应力、压缩量和桩体应力桩底下刺入持力层的变形量分别为:

$$\sigma_s(z) = \sigma_{s0} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot L_0} e^{\lambda_2 \cdot z} \quad (12)$$

其中: $\lambda_2 = \frac{\pi d}{A_s} \cdot K_{0d} \cdot \tan\phi_d$, K_{0d}、ϕ_d 为加固区等沉面以下土体的静止侧压力系数和内摩擦角。

$$S_d = \frac{\sigma_{s0}}{E_{sd} \cdot \lambda_2} (e^{-\lambda_1 \cdot L_0}) [e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)} - 1] \quad (13)$$

$$\sigma_{pd} = \sigma_{p0} + M \cdot \sigma_{s0} [1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0} e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)}] \quad (14)$$

桩底下刺入持力层的变形量:

$$S_{下刺} = C_d \cdot \{\sigma_{p0} + M \cdot \sigma_{s0} [1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0} e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)}] - \sigma_{s0} \cdot e^{-\lambda_0 \cdot L_0} e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)}\} \quad (15)$$

其中: C_d 为桩体地面作用于下卧层单位压力时的竖向刺入变形 (m/MPa)。

3.3　桩土应力比求解

根据桩-土变形协调方程可以得到:

$$\frac{\sigma_{s0}}{E_{su} \cdot \lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0}) = C_u \cdot (\sigma_{p0} - \sigma_{s0}) \quad (16)$$

化简得到:

$$n = 1 + \frac{1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0}}{E_{su} \cdot \lambda_1 \cdot C_u} \quad (17)$$

$$\frac{e^{-\lambda_1 \cdot L_0} \cdot [e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)} - 1]}{E_{sd} \cdot \lambda_2 \cdot C_d}$$

$$= n + M \cdot [1 - e^{-\lambda_1 \cdot L_0} e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)}] - e^{-\lambda_1 \cdot L_0} e^{\lambda_2 \cdot (L - L_0)} \quad (18)$$

以上是推导出来的刚性桩复合地基桩-土应力比的隐式计算公式。将 L_0 和 n 作为未知量,两个方程可解两个未知数,但方程 L_0 解很复杂,姚笑清指出 POOROOSHASB 用简化的数值方法研究了刚性和柔性桩在填土荷载作用下桩侧的负摩擦阻力,研究发现:荷载大小对等沉面位置影响很小,可以忽略不计。本文中等沉面深度参照 CFG 桩的规范估算,取 $L_0 = (0.5 \sim 0.6) L$[4]。

4　实例

试验场地为某一住宅楼复合地基,砼芯水泥土搅拌桩桩径 60cm,砼芯平均截面尺寸 20×20cm,桩间距是 2.0m,地基静载荷试验承压板为 $D = 1.84$m,观测压力盒读数,计算桩土应力比。其中砼芯模量为 2.6×10^4MPa,外芯模量为 2×10^2MPa,则其复合模量为 3.851×10^3MPa。C_u, E_{su}, ϕ_{0u}, 由地质资料查得, K_{0u} 用土压力盒测出。将垫层取为 40cm,计算结果和实测结果见表 1。

表 1　计算结果对比

计算结果	68	69	78	82	79
实测结果	73	82	91	97	88

从上表计算结果与实测结果上看,计算结果与实测结果差距不大,实测结果偏大,而应力比的实测结果是先增大后减少。这是因为在加载初期,土体的孔隙率比较大,摩擦角较小,土比较松散,大部分荷载被桩体承担,所以桩土应力比是增大的;随着荷载增加,土逐渐密实,桩与土逐渐形成复合地基,共同承担荷载,使得桩土应力比减小。

5　结论

(1) 砼芯水泥土搅拌桩具有较高的强度,能很好地改善地基的承载性能;

(2) 本文推导的砼芯水泥土搅拌桩复合地基桩-土应力比的隐式公式能够考虑到桩侧负摩阻力的影响,将其应用于桩土应力比的计算与工程实例具有较好的一致性;

(3) 当计算范围内的土层为成层土时采用分层总和法计算相应土层的沉降量;

(4) 砼芯水泥土搅拌桩复合地基桩土应力比的计算理论还不成熟,有待进一步探讨。

参　考　文　献

[1] 董平. 砼芯水泥土搅拌桩荷载传递机理研究 [J]. 中国科学院博士论文, 2004. 11.

[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, 2002.

[3] 刘杰等, 复合地基荷载传递规律及变形. [J]中国公路学报, 2004, 17(1): 20-23.

[4] 姚笑清. 桩基沉降的实践与负摩擦阻力的理论分析 [D]. 上海:同济大学, 1999.

第一作者通讯地址:长沙市韶山南路 22号中南大学铁道校区学生 1舍 506室　**邮编**: 410075

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net