

复合地基中砂垫层作用机理研究

沈才华,任明,许永明

(河海大学交通与海洋工程学院,江苏南京 210098)

摘要:对复合地基砂垫层建立砂、土、桩复合单元体,利用砂垫层极限平衡理论推导出砂垫层桩土应力协调方程,并应用该方程对桩土应力比、砂垫层厚度以及置换率等综合因素进行分析,且分析结果与实际情况完全吻合,很好地反映了砂垫层的作用机理。

关键词:砂垫层;桩土应力比;复合单元体;协调方程

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2003)05-0569-04

“复合地基”最基本的假定是增强体与桩周土变形协调,即共同作用。而在共同作用过程中(砂)垫层能使荷载按一定比例在桩与桩间土之间合理分配,协调桩土应力比,充分发挥桩与桩周土的承载能力,使原有地基承载力得到提高,从而沉降量得到减小。由现场实测和试验可知,对于中低置换率的复合地基,改变褥垫层厚度能够影响桩土应力比,褥垫层越薄,桩土应力比越大;褥垫层越厚,桩土应力比越小。但目前对砂垫层作用机理的研究很少,而且大都基于实际测量定性地进行描述,定量的理论研究还没有,因此有必要对此作进一步的研究,以利于进一步分析深层搅拌桩复合地基的作用机理。

通过分析可知,垫层的主要作用是利用其自身的极限破坏滑动性来调节桩顶桩土应力比的发挥程度。因此,本文假设桩端不发生刺入破坏,并以砂作为垫层进行分析,同时根据砂垫层极限破坏理论,推导出砂垫层作用下增强体顶部桩土应力协调方程,有效地分析了砂垫层作用机理。

1 砂垫层破坏理论

1.1 砂垫层复合单元体

利用单元体理论对砂垫层进行分析,单元体如图 1 所示。

不计砂垫层的体力,把整个单元体倒置过来,如图 2 所示。对砂垫层利用极限破坏理论进行分析,一般情况,垫层内桩所对应的圆柱面为极限破坏面,但为了简化计算,近似地取桩中心线上的点的极限破坏进行分析。由于桩的半径一般都比较小,这种近似产生的误差很小,可以忽略。

假设桩顶桩土应力比为 $n' = \sigma_p / \sigma_s$,其中桩顶上应力为 σ_p ,桩间土应力为 σ_s 。根据三角形桩体分布的对称性,可利用复合单元体(图 2)理论进行分析。由图 1 可知,复合地基置换率 $m = a^2 / b^2$,对砂垫层,取粘性系数 $c = 0$,由极限平衡理论知

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (1)$$

令 $k = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$,则式(1)简化为

$$\sigma_1 = k \sigma_3 \quad (2)$$

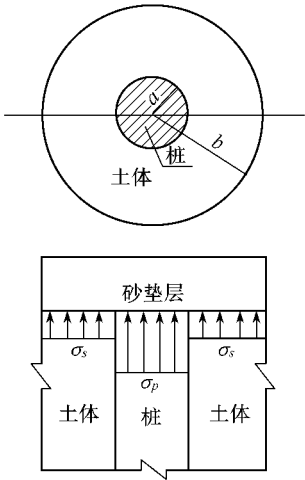


图 1 砂垫层复合单元体
Fig.1 Composite element in sand cushion

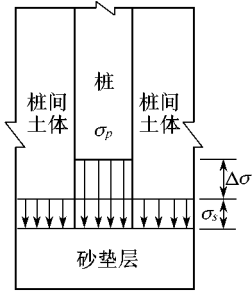


图 2 复合单元体受力
Fig.2 Stress in composite element

式中 σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力。

忽略砂垫层质量的影响,把作用在砂垫层上的分布应力简化成 σ_s 大圆形均布荷载和 $\Delta\sigma = \sigma_p - \sigma_s$ 小圆形均布荷载的叠加,分别用半空间体在边界上受法向集中力的解答积分求得在荷载圆正下方的应力分布,然后利用式(1)或式(2)可推求出砂垫层作用下桩顶桩土应力比协调方程。

1.2 半空间体边界上受法向圆形均布荷载应力分布公式的推导

由弹性力学可知半空间体边界上受法向集中力作用下的应力分布^[1]。

设有半空间体,体力不计,在其边界面上有集中力 p ,在应力边界条件

$(\sigma_z)_{z=0, r \neq 0} = 0$ (τ_{rz}) $_{z=0, r \neq 0} = 0$ 下布希涅斯克应力解答为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p}{2\pi R^2} \left[\frac{(1-2\mu)R}{R+z} - \frac{3r^2 z}{R^3} \right] & \sigma_\theta = \frac{(1-2\mu)p}{2\pi R^2} \left(\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right) \\ \sigma_z = -\frac{3pz^3}{2\pi R^5} & \tau_{rz} = \tau_{rz} = -\frac{3prz^2}{2\pi R^5} \end{cases} \quad (3)$$

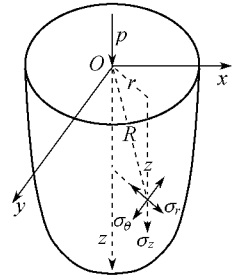


图3 布氏应力分布示意图

Fig.3 Distribution of Boussinesq stress

式中 $r^2 + z^2 = R^2$,其他符号意义见图3.利用式

(3)的解答,可用叠加法求得均布法向荷载 q 作用下半径为 r_0 的圆面积上的应力解答.如图

4所示,为求得 z 轴上任意一点的应力分量 σ_z ,可以把荷载面积分为微分圆环,用圆环上的荷载 $2q\pi r dr$ 代替式(3)中 σ_z 表达式中的 p ,对 r 进行积分,就可得到

$$\sigma_z = -\frac{3z^3}{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{2\pi r dr q}{(r^2 + z^2)^{5/2}} = -q \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r_0^2)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

式(3)的应力分布情况如图3所示,即沿 z 轴建立轴对称坐标系, σ_z 为竖向应力, σ_r 为径向应力, σ_θ 为环向应力, τ_{rz} 为切向应力.因为对称性, $\sigma_r = \sigma_\theta$, $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \tau_{rz}$.现求该点的应力分量 σ_r , σ_θ .将荷载面积分为微分面积,如图1、2、3、4等,由于微分面积1及2相互对称且其上的2个荷载为 $qrd\varphi dr$,按照式(3)可求得 $(d\sigma_r)_{1,2}$ ($d\sigma_\theta$) $_{1,2}$.同样,由于微分面积3及4相互对称且其上的荷载各为 $qrd\varphi dr$,根据式(3)可求得 $(d\sigma_r)_{3,4}$ ($d\sigma_\theta$) $_{3,4}$.通过叠加,即得微分面积1、2、3、4上荷载引起的应力分量为

$$d\sigma_r = d\sigma_\theta = \frac{qrd\varphi dr}{\pi} \left[\frac{(1-2\mu)z}{R^3} - \frac{3r^2 z}{R^5} \right] \quad (5)$$

为求得全部荷载在该点处引起的应力分量,只需将式(5)先对 φ 从0积分到 $\pi/2$,后对 r 从0积分到 r_0 ,就可得到

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -\frac{q}{2} \left[1 + 2\mu + \frac{z^3}{(z^2 + r_0^2)^{3/2}} - \frac{(1+\mu)z}{(z^2 + r_0^2)^{1/2}} \right] \quad (6)$$

2 桩顶桩土应力比协调方程推导

假设小圆形均布荷载 $q_1 = \Delta\sigma$ 在 z 轴下方产生的应力为 σ_{z1} , σ_{r1} , 圆半径为 $r_0 = a$,大圆形均布荷载 $q_2 = \sigma_s$ 在 z 轴下方产生的应力为 σ_{z2} , σ_{r2} , 圆半径为 $r_0 = b$,则利用叠加原理,在砂垫层内 z 轴下方产生的应力为 σ_z , σ_r , 即

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} \quad \sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \quad (7)$$

把式(4)、(6)代入式(7)得

$$\sigma_z = \Delta\sigma \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + a^2)^{3/2}} \right] + \sigma_s \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + b^2)^{3/2}} \right] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r = \sigma_\theta = & \Delta\sigma \left[1 + 2\mu + \frac{z^3}{(z^2 + a^2)^{3/2}} - \frac{(1+\mu)z}{(z^2 + a^2)^{1/2}} \right] / 2 + \\ & \sigma_s \left[1 + 2\mu + \frac{z^3}{(z^2 + b^2)^{3/2}} - \frac{(1+\mu)z}{(z^2 + b^2)^{1/2}} \right] / 2 \end{aligned} \quad (9)$$

因为 $n' = \sigma_p / \sigma_s = (\sigma_p - \sigma_s + \sigma_s) / \sigma_s = 1 + (\sigma_p - \sigma_s) / \sigma_s = 1 + \Delta\sigma / \sigma_s$,又令 $n = \Delta\sigma / \sigma_s$,则 $n' = n + 1$,把(8)、(9)两式代入式(2),整理后得

$$\begin{aligned} n+1-kn(1+2\mu)/2-k(1+2\mu)/2 &= (nk/2+n)z^3/(z^2+a^2)^{3/2}+ \\ & (k/2+1)z^3/(z^2+b^2)^{3/2}-nk(1+\mu)z/(z^2+a^2)^{1/2}-k(1+\mu)z/(z^2+b^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

此方程为参数协调方程,它主要反映了桩土应力比 n' 、摩擦角 φ 、置换率 m 、泊松比 μ 和砂垫层厚度 $h = z$ 的变化规律.利用计算机可对协调方程进行数值求解,并可根据不同参数对实际情况作出分析.

3 作用机理分析

a. 当采用承压板进行现场加荷试验时,增强体顶部桩土应力比随砂垫层厚度逐渐减小.对于高粘结强度桩复合地基,当褥垫层厚度 $h < 20\text{ cm}$ 时,桩顶桩土应力比很大,且主要由桩来承担;当褥垫层厚度 $h > 30\text{ cm}$ 时,桩顶桩土应力比显著减少^[2,3].利用本文推导的协调方程,取 $k = 3$, $\mu = 0.5$, $m = 5.3\%$,可得桩顶桩土应力比与(砂)垫层厚度关系(图 5(a)实线).由图 5(a)可知,理论计算值与文献[4]试验实测值较吻合,说明该协调方程可反映(砂)垫层的真实作用情况.关于(砂)垫层厚度的选取,主要由桩与桩间土的塑性极限强度来决定.一般深层搅拌桩与桩间土的塑性极限强度比为 2~10,如考虑桩身强度的不均匀性及桩间土性质的改善作用,则深层搅拌桩与桩间土的塑性极限强度比略有减小,而只有当桩与桩间土同时达到塑性极限破坏状态时,桩土共同作用才最有效.因此,根据本文的协调方程,建议砂垫层厚度取 30~50 cm.

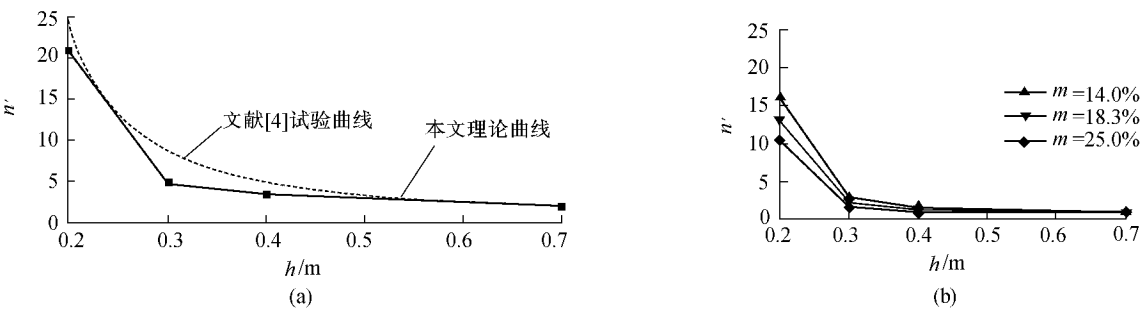


图 5 $h \sim n'$ 关系
Fig.5 Relationship between h and n'

本文提出的(砂)垫层协调方程主要是从应力比的角度进行分析的,在实际分析中,由于桩土共同作用,故还要考虑土的极限承压条件.当复合单元体四周土的压力加大,土体先破坏时,(砂)垫层将因土的压缩变形而产生内部的协调滑动,桩顶桩土应力比也将产生相应的变动,此时桩土应力比达到第 1 个峰值;当土体由于压缩变形而使强度提高后,桩土应力比将趋于稳定,并在桩间土承载力范围内又将随着荷载的增加而增加,且由于砂垫层的变薄而总体上桩土应力比较前一阶段大,桩破坏时桩土应力比达到第 2 个峰值.这个过程充分反映了(砂)垫层对桩土共同作用的过程,这与实测值规律一致^[4].这说明本文对(砂)垫层的研究方法和思路是合理和符合实际情况的.

b. 若把承载力用某一固定应力 σ_s 乘以一个系数(承载力系数 a)来进行分析,如图 5(b)所示,当置换率增加时,桩土应力比有部分减小的趋势.但由于置换率的增加,复合地基的承载力总的呈增加趋势(图 6).由两者的比例关系曲线可知,存在某一最优置换率,此后再增加置换率已对承载力的提高影响不大,当砂垫层厚度不是很薄时,甚至反而会使承载力降低.所以,砂垫层对承载力的调节作用是很有限制的,它仅能在增强体与原土之间使桩土应力比更加合理,从而充分发挥桩间土的承载力,而整体地提高复合地基的承载力.能使(砂)垫层让桩与桩间土最有效地发挥作用,主要是因为对于 30~50 cm 厚(砂)垫层,不同的置换率复合地基,其(砂)垫层可调节的桩土应力比虽然不大,但它与深层搅拌桩与桩间土的塑性极限强度比范围基本一致.由图 5(b)可知在 1~6 之间.也就是说,如果(砂)垫层很薄甚至没有,由于上面的刚性承台作用,则即使桩达到极限承载力,桩间土也发挥不了多少作用,桩与桩间土不能很好地协调工作;而如果(砂)垫层很厚,则将由(砂)垫层的作用,即使桩间土达到极限承载力,桩的强度仍基本没有得到发挥,起不到桩应有的作用.因此,实际情况中(砂)垫层

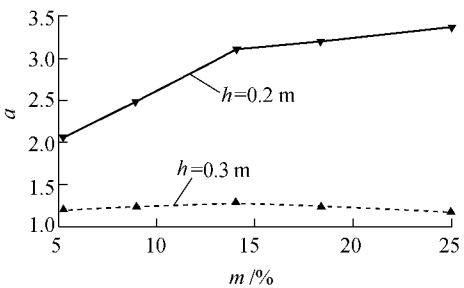


图 6 $m \sim a$ 关系
Fig.6 Relationship between m and a

厚度范围(取 30 ~ 50 cm)和桩顶桩土应力比取值范围的确定,主要是由(砂)垫层本身的性质(这可从本文推导的协调方程得到反映)以及深层搅拌桩自身的特点共同决定的.故本文推得的桩顶桩土应力比协调方程能很好地反映(砂)垫层的真实作用机理.

4 结 论

a. 砂垫层具有协调桩土应力的作用,一般情况下,刚开始加载时,增强体顶部桩土应力比随砂垫层厚度的增加而减小,当砂垫层足够厚时,桩土应力趋于均匀化.

b. 复合地基上部结构对不均匀沉降有严格要求时,砂垫层的作用很明显.由本文提出的协调方程计算可知,一般砂垫层厚度应取 30 ~ 50 cm.这与实际工程中根据经验提出的砂垫层厚度应取 30 ~ 50 cm是完全一致的.

c. 深层搅拌桩复合地基作用的过程实质上是上部荷载通过砂垫层将荷载按一定比例分配到桩与桩间土,桩与桩间土之间又根据下卧层地质情况进行协调变化的过程.在这个过程中,砂垫层起到很大作用.本文从砂垫层作用机理角度考虑所得出的砂垫层桩顶桩土应力比协调方程,有助于对复合地基作用机理的进一步分析,便于更好地确定桩顶桩土应力比的大小和变化过程.

参考文献:

- [1] 沃国纬,王元淳.弹性力学[M].上海:上海交通大学出版社,1998.283—290.
- [2] 龚晓南.地基处理手册[M].第2版.北京:中国建材工业出版社,2000.445—447.
- [3] 刘正峰.地基与基础工程新技术实用手册(3)[M].北京:海洋出版社,2000.3164—3166.
- [4] 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.

Function of sand cushion in composite foundations

SHEN Cai-hua, REN Ming, XU Yong-ming

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract An analysis is made of the construction of sand-soil-pile composite elements in the sand cushion of composite foundations. By use of the limit-destruction theory, an equation of compatibility of pile-soil stress in the sand cushion is derived and applied to the analysis of some factors, including the pile-soil stress ratio, sand cushion thickness, and replacement ratio. The calculated result basically agrees with the practical situation, showing the strong capability of the method to reflect the mechanism of function of the sand cushion. Through theoretical analysis and calculation of the function of the sand cushion by the present method, the pile-soil stress and its variation process can be determined. The present research provides an alternative approach to the study of sand cushions.

Key words sand cushion; pile-soil stress ratio; composite element; equation of compatibility