



水泥土搅拌桩长芯复合地基桩土应力比计算研究

付 颖¹, 王先亚², 曾玉昆¹, 易 凯¹, 肖尊群²

(1. 湖北交投建设集团有限公司, 湖北 武汉 430058 ; 2. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 桩土应力比是复合地基的重要设计参数, 加芯搅拌桩复合地基桩土应力比的计算是一个工程技术难题。针对长芯搅拌桩, 采用“截面法”将其划分上部等芯桩和下部刚性桩; 前者采用考虑柔性荷载作用下的侧阻分段非线性分布模式, 后者采用线性侧阻分布模式; 采用叠加原理计算长芯搅拌桩的桩土应力比。研究表明: 高填方路堤柔性荷载作用下, 侧阻分段非线性分布模式提高了桩的竖向荷载的分担比。桩径越大、桩长越长, 桩土应力比越大。桩长对桩土应力比的影响幅度大于桩径。本文结果可为相关研究提供参考。

关键词: 长芯水泥土搅拌桩; 桩侧摩阻力; 复合地基; 桩-土应力比; 截面法

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)10-0021-10

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.10.128

Study on calculation of pile-soil stress ratio of cement-soil mixed pile with long core composite foundation

FU Ying¹, WANG Xianya², ZENG Yukun¹, YI Kai¹, XIAO Zunqun²

(1. Hubei Communications Investment Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430058, Hubei, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The pile-soil stress ratio is an important design parameter of composite foundation, and the calculation of the pile-soil stress ratio of composite foundation with mixed core pile is a difficult engineering problem. For long core mixing pile, the section method is used to divide the upper equal core pile and the lower rigid pile. The former adopts the sectional nonlinear distribution model of lateral resistance under flexible load, while the latter adopts the linear lateral resistance distribution model and adopts the superposition principle to calculate the pile-soil stress ratio of long-core stirred pile. The results show that the lateral resistance segment nonlinear distribution model increases the vertical load sharing ratio of pile under the flexible load of high fill embankment. The larger the pile diameter and the longer the pile length, the greater the pile-soil stress ratio. The influence of pile length on pile soil stress ratio is greater than that of pile diameter. The results can provide references for similar study.

Key words: long-core cement-soil mixing pile; pile lateral friction resistance; composite foundation; pile-soil stress ratio; method of section

水泥土搅拌桩桩身刚度低, 在竖向荷载作用下, 桩身轴向变形明显, 桩长受到限制, 一般处理深度不超过 15 m。通过往水泥土搅拌桩截

面型芯位置插入预制钢筋混凝土桩形成加芯水泥土复合桩, 可以大大提高桩身刚度, 提高处理深度, 对于深厚淤泥软土地基的处理具有经济

收稿日期: 2023-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308424)

作者简介: 付 颖(1990—), 女, 工程师, 从事公路与桥梁现场施工技术、成本核算、成本管控方面工作。

通信作者: 王先亚(1994—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程方面研究。

和技术优势。水泥土搅拌长芯复合桩是指预制芯桩穿透水泥土搅拌桩进入搅拌桩桩端深度位置以下地层的一种复合桩型^[1]。

桩土应力比是指桩顶位置处桩和桩周土体对上部竖向荷载的分担比,它是复合地基的一个非常重要的参数。关于刚性桩、柔性桩所组成的复合地基的桩土应力比的理论计算方法,国内有很多专家学者做了大量研究,取得了不少成果。罗强等^[2]推导出了高填方路堤作用下的刚性碎石桩的桩土应力比的解析解。吕伟华等^[3]推导出考虑褥垫层刺入深度的路堤荷载作用下带帽刚性桩的桩土应力比解析解。袁杰^[4]推导出了考虑等沉面模型中路堤产生的土拱效应的路堤荷载作用下的柔性桩桩土应力比解析解。

针对长芯搅拌桩的桩土应力比计算问题,基于前人研究,采用“截面法”将长芯复合桩沿着搅拌桩深度位置截开,形成上部桩体和下部桩体。上部桩体按等芯桩考虑,同时考虑侧阻分段分布的非线性^[5-8],分析对应的等沉面位置和桩土应力比。下部桩体按刚性桩考虑,采用侧阻线性分布模式^[9-10],分析桩土应力比。然后通过形变协调关系和叠加原理得到整个复合桩桩土应力比。上述方法既考虑了柔性荷载作用下,侧阻分布模式的非线性,又考虑了刚性桩体侧阻线性分布的特点。在计算加芯复合长芯桩桩土应力比方面进行了一定的尝试,虽然计算过程相对复杂,借助计算机工具,依然可以在特定算法下实现桩土应力比的快速计算,为加芯桩的理论设计提供理论支持。

1 水泥土搅拌长芯复合桩理论力学分析模型

芯桩长度的增加使得桩体内外桩所承担的高填方路堤荷载被重新分配,芯桩由于其凸出的长度,可以为整个桩体提供附加的桩身侧摩阻力,芯桩桩端刺入下卧持力层时可以提供更多的承载力。由于水泥土搅拌长芯复合桩在外形上仅是芯桩长度发生了变化,因此,对桩体进行力学分析时可以将整体划分为上部等芯桩和下部刚性桩两个部分进行考虑。上部桩体侧摩阻力按照非线性侧阻分布模式来计算,下部凸出的芯桩可视为带

有桩帽的刚性桩,其桩侧摩阻力按照线性侧阻分布模式计算。芯桩为刚体,竖向荷载作用下,不产生压缩变形,只存竖向刚体位移。水泥土桩与桩周土体为变形体,既能产生压缩变形,也能产生竖向刚体位移。桩体与土体的相对位移形成桩侧摩阻力作为承担高填方路堤荷载的主要部分。

水泥土搅拌长芯复合桩桩身极限侧摩阻力计算公式按照下式计算^[11]:

$$\tau_s(z) = c_a + K_0(\gamma z + p_s) \tan \varphi_a \quad (1)$$

水泥土搅拌长芯复合桩上部桩侧摩阻力分布模式为^[11]:

$$\tau_s = \begin{cases} -Az - B & (0 \leq z \leq L_1) \\ \frac{Az^2 + (B - AL_0)z - BL_0}{L_0 - L_1} & (L_1 \leq z \leq L_0) \\ \frac{Az^2 + (B - AL_0)z - BL_0}{L_2 - L_0} & (L_0 \leq z \leq L_2) \\ Az + B & (L_2 \leq z \leq L) \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ_s 表示桩侧摩阻力, kPa; $A = K_0 \gamma \tan \varphi_a$, $B = c_a + K_0 P_s \tan \varphi_a$; K_0 为水平土压力系数; c_a 、 φ_a 分别为桩土界面上的黏聚力(kPa)和摩擦角($^\circ$); r 为土体重力密度, kN/m^3 ; P_s 为桩顶位置土体竖向应力, kPa; z 为桩深位置, m; L_0 为中性位置的深度, m; L_1 、 L_2 为侧阻分段分布位置的特征深度, m; L 为水泥土搅拌桩长, m。

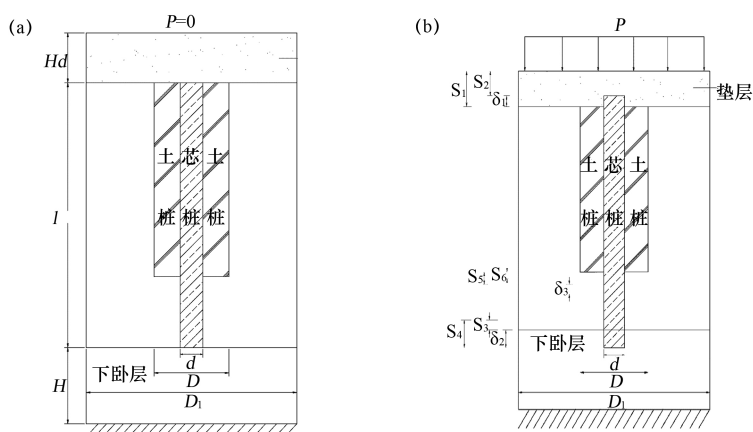
由于芯桩不产生压缩变形,凸出的芯桩其力学性能参数等同于刚性桩,侧阻力简化为线性分布^[12]。极限桩侧摩阻力计算公式 $\tau_z = k_a \sigma_p \tan \varphi_a$, 其中, 令 $\zeta = k_a \sigma_p$, 水泥土桩端面以下凸出芯桩部分的桩侧摩阻力分布假设为线性分布, 桩土接触面侧摩阻力分布如式(3)所示。

$$\tau_s = \begin{cases} \tau_z \left(1 - \frac{z}{L'_0}\right) & (L \leq z \leq L'_1) \\ -\tau_z & (L'_1 \leq z \leq L') \end{cases} \quad (3)$$

式中: L'_0 为芯桩桩侧阻力为 0 的深度位置, m; L'_1 为侧阻力为负的最大值位置深度, m; L' 为水泥土搅拌长芯复合桩桩长, m。

2 芯桩 - 水泥土桩 - 土 - 褥垫层协调方程

复合地基单元体无荷载作用状态如图 1(a) 所示。在均布荷载 p 作用下的受力变形如图 1(b) 所示。形变协调关系如表 1 所示。



位置	关系
上部加芯桩部分	$S_s = S_{s1} + S_{s2}$
	$S_{s1} = S_1 + S_6$
	$\delta_p = S_2 - S_5$
	$S_1 = S_2 + \delta_1$
	$S_6 = S_5 - \delta_2$
下部凸出的芯桩部分	$S_{s2} = S_5 - S_3$
	$S_5 = S_6 + \delta_3$
	$S_3 = S_4 - \delta_2$
	$\delta_p = S_6 - S_4 = 0$
桩周土总的压缩变量	$S_s = \delta_1 + 2\delta_2 + \delta_3 + \delta_p$

注: S_s 表示桩周土体总压缩变形量, m; S_{s1} 表示等沉面以上桩周土体压缩变形量, m; S_{s2} 表示等沉面以下桩周土体压缩变形量, m; S_1 为桩周土顶面的沉降量, m; S_2 为桩体顶面的沉降量, m; S_3 为桩间土底面的沉降量, m; S_4 为桩体底面的沉降量, m; S_5 为水泥土桩桩底面土体的压缩沉降量; S_6 为水泥土桩桩底面压缩沉降量, m; δ_1 为桩顶端面刺入褥垫层的深度, m; δ_2 为桩底端面刺入下卧层的深度, m。

长芯桩的上部桩体可视为等芯水泥土搅拌桩, 桩体存在等沉面位置。在选取桩侧摩阻力分布形式时, 由于上部桩体为等视作等芯桩, 属于半柔半刚性桩体, 在高填方路堤等柔性荷载作用下, 桩侧摩阻力呈非线性分段分布模式^[11]。长芯桩可假定为刚体, 凸出部分的下部桩体为钢筋混凝土芯桩, 属于刚性桩, 在上部荷载作用下, 侧摩阻

力呈线性分布^[7]。在计算长芯复合桩的桩土应力比时,采用截面法,将桩体沿搅拌桩端截断,上部桩体按等芯桩半柔半刚性桩分析,下部芯桩凸出部分按刚性桩体分析,然后将两者结果进行叠加。桩体变形都在小变形条件下进行的,因此,叠加原理在这里是适用的。

如图 2 所示, 加芯水泥土桩桩顶处芯桩、水泥土桩及土体的竖向附加应力分别用 P_c 、 P_m 和 P_s 表示, kPa; 则桩顶竖向应力 P_p (kPa) 可用 P_c 、 P_m 芯桩截面、搅拌桩截面面积加权平均得到^[9]; 复合桩土应力比 $n = P_p/P_s$; 在计算单元体的受力简图中, σ_m 、 σ_s 为上部荷载经褥垫层调整后引起的桩及桩间土竖向应力, kPa; 设长芯水泥土搅拌桩复合地基上部高填方路堤传至褥垫层顶面的均布荷载为 P , kN; 桩体面积置换率为 m , 则有如下关系^[13]:

$$P = m\sigma_m + (1 - m)\sigma_s \quad (4)$$

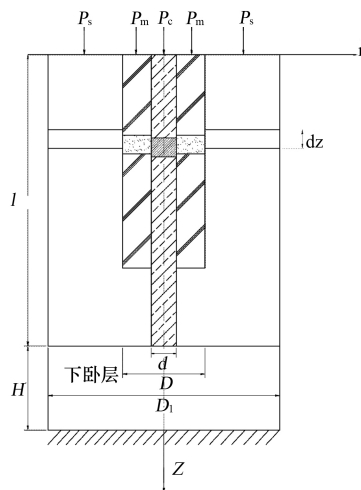


图2 长芯桩复合地基环单元受力分析

以桩间土顶面为基准面选取的桩周土微单元, 受力平衡分析如图 3, 可得等沉面上部土体单元受力平衡方程:

$$A_s \sigma_s - A_s (\sigma_s + d\sigma_s) - \pi D \tau_s dz = 0 \quad (5)$$

式中: A_s 为复合地基单桩处理面积, m^2 ; σ_s 为上部荷载引起的土体沿深度方向附加应力, kPa ; D 为搅拌桩径, m ; τ_s 为桩侧向摩阻力, kPa , 沿深度方向的分布规律满足式(2)。

同理, 通过对长芯桩上部桩身单元进行分析, 如图 4, 可得受力平衡方程:

$$A_m \sigma_m - A_m (\sigma_m + d\sigma_m) + \pi D \tau_s dz - \pi d (\tau_m + \tau_p) dz = 0 \quad (6)$$

式中: A_m 为搅拌桩截面积, m^2 ; d 为芯桩直径, m ; τ_p 为下部芯桩正摩阻力区桩侧摩阻力, kPa ; τ_m 为上部芯桩与搅拌桩之间的侧摩阻力, kPa , 根据文献 [14], 其值与水泥土桩与芯桩的相对位移 ω_0 成正比, 即 $\tau_m = k_0 \omega_0$, k_0 为与相对位移有关的摩擦系数。其余同上。式(6)受力平衡方程化简为

$$\frac{d\sigma_m}{dz} = \frac{\pi D \tau_s - \pi d (\tau_m + \tau_p)}{A_m} \quad (7)$$

$$\sigma_{mi} = \begin{cases} -\frac{\pi D (B_z + 1/2Az^2) + d\pi z (-\xi\sigma_{s0} + k_m\omega_m + z\xi\sigma_{s0}/2L_0)}{A_m} + \lambda_1 & (0 \leq z \leq L_1, i=1) \\ \frac{\pi D (2Az^3 + 3z^2(B - AL_0) - 6BL_0z)}{6A_m(L_0 - L_1)} + \frac{d\pi z (-\xi\sigma_{s0} - k_m\omega_m - z\xi\sigma_{s0}/2L_0)}{A_m} + \lambda_1 & (L_1 \leq z \leq L_0, i=2) \\ \frac{\pi D (z^2(B - AL_0) + 2z(Az^2 - BL_0))}{2A_m(L_0 - L_2)} + \frac{d\pi z (-\xi\sigma_{s0} - k_m\omega_m - z\xi\sigma_{s0}/2L_0)}{A_m} + \lambda_1 & (L_0 \leq z \leq L_2, i=3) \\ \frac{\pi D (Bz + 1/2Az^2 + d\pi z (\xi\sigma_{s0} - k_m\omega_m - z\xi\sigma_{s0}/2L_0))}{A_m} + \lambda_4 & (L_2 \leq z \leq L, i=4) \end{cases} \quad (9)$$

将式(1)和式(2)代入(8)中, 并根据各区段表达式积分可得下式:

$$\sigma_{si}[z] = \begin{cases} \left(Bz + \frac{Az^2}{2}\right)\beta_s\lambda_5 & (0 \leq z \leq L_1, i=1) \\ -\frac{(2Az^3 + 3(B - AL_0)z^2 - 6BL_0z)\beta_s}{6(L_0 - L_1)}\lambda_6 & (L_1 \leq z \leq L_0, i=2) \\ \frac{(2Az^3 + 3(B - AL_0)z^2 - 6BL_0z)\beta_s}{6(L_0 - L_2)}\lambda_7 & (L_0 \leq z \leq L_2, i=3) \\ -\left(Bz + \frac{Az^2}{2}\right)\beta_s\lambda_8 & (L_2 \leq z \leq L, i=4) \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\beta_s = \pi D \mu K_a / A_s$, K_a 为侧压力系数; μ 为搅拌桩桩侧摩擦系数, 其余同上。

根据应力连续性边界条件可以求出 $\lambda_1 \sim \lambda_8$ 。

$$\frac{d\sigma_s}{dz} = \frac{\pi D \tau_s}{A_s} \quad (8)$$

将式(1)和式(2)代入(7)中, 并根据各区段表达式积分可得下式:

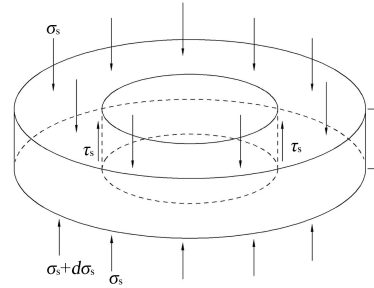


图 3 长芯桩上部土体单元受力平衡示意

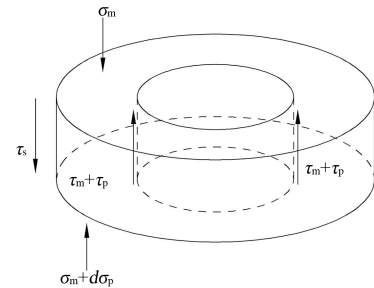


图 4 长芯桩上部复合桩环单元受力示意

3.2 桩-土压缩变形量计算

对式(8)进行分段积分得到等沉面 L_0 上、下土体压缩变形量分别为

$$S_{s1} = \int_0^{L_1} \frac{\sigma_{s1}(z)}{E_{s1}} dz + \int_{L_1}^{L_0} \frac{\sigma_{s2}(z)}{E_{s1}} dz = \frac{(4B + 3AL_1)L_0^2 + AL_0^3 + 4BL_0L_1 + L_1^2(-2B + AL_0 - AL_1 + 2(3B + AL_1)\beta_s)}{12E_{s1}} \quad (11)$$

$$S_{s2} = \int_0^{L_2} \frac{\sigma_{s3}(z)}{E_{s2}} dz + \int_{L_2}^L \frac{\sigma_{s4}(z)}{E_{s2}} dz = \frac{-L_0^2(A(L_0 + L_2) + 4B) + L_2^2(AL_0 + (2B - 2AL_0 + AL_2)\beta_s)}{12E_{s2}} \quad (12)$$

式中: E_{s1} 、 E_{s2} 为等沉面 L_0 上下层土体压缩模量, MPa。

缩变形量分别为

正摩阻力区桩体压缩变形量:

同理, 由式(7)可得等沉面 L_0 上、下桩体压

$$S_{p1} = \int_0^{L_1} \frac{\sigma_{m1}(z)}{E_{m1}} dz + \int_{L_1}^{L_0} \frac{\sigma_{m2}(z)}{E_{m2}} dz = \frac{d\pi\xi\sigma_{s0}[(L_1^2(L_1 - 3) - L_0^2(L_0 - 3)E_{m1}) + E_{m2}(3L_0' L_1^2 - L_1^3)]}{6A_m E_{m1} E_{m2} L_0'} - \frac{A\pi D[(L_0^3 - L_1^3)E_{m1} + 12L_1^3 E_{m2}] + L_0 L_1 (L_0 + L_1) E_{m1} + 2B\pi D[(3L_0^2 - (L_1 - L_0))E_{m1} - 3L_1^2 E_{m2}]}{12A_m E_{m1} E_{m2}} - \frac{d\pi k_m \omega_m [E_{m1} L_0' (L_1^2 + L_0^2) + E_{m2} L_1^2]}{2A_m E_{m1} E_{m2} L_0'} \quad (13)$$

式中: E_{m1} 、 E_{m2} 为特征深度 L_1 上、下桩体弹性模量, MPa。

负摩阻力区桩体压缩变形量:

$$S_{p2} = \int_{L_0}^{L_2} \frac{\sigma_{m3}(z)}{E_{m3}} dz + \int_{L_2}^L \frac{\sigma_{m4}(z)}{E_{m4}} dz = \frac{d\pi(E_{m4}(L_0^3 - L_2^3) + E_{m3}(-L^3 + L_2^3))\xi\sigma_{s0}}{6A_m E_{m3} E_{m4} L_0'} + \frac{\pi D(3B(L^2 - L_2^2) + A(L^3 - L_2^3))}{6A_m E_{m4}} + \frac{d\pi(\xi\sigma_{s0} + k_m \omega_m)(E_{m3} L_0' (L^2 - L_2^2) - E_{m4}(L_0^2 - L_2^2))}{2A_m E_{m3} E_{m4} L_0'} \quad (14)$$

式中: E_{m1} 、 E_{m2} 为特征深度 L_2 上、下桩体弹性模量, MPa。

传递到桩端位置处的桩间土、桩端应力分别为

$$\sigma_{sd} = \sigma_{s4L} = -\left(BL + \frac{AL^2}{2}\right)\beta_s + P_s + \frac{1}{6}[3B(L_1 + L_2 + 2L_0 - 2L) + A(L_1^2 + L_2^2 - 3L^2) + AL_0(L_1 + L_2 + 2L_0)]\beta_s \quad (15)$$

$$\sigma_{md} = \sigma_{m4L} = \sigma_m - \frac{\pi D(AL_0^2 + 3BL_1 + AL_1^2 + L_0(3B + AL_1) + 3L_2(2B + AL_2))}{6A_m} + \frac{\pi D[-L_0(-2AL_0^2 + L_0(B + AL_0))]}{2A_m} - \frac{\pi D[L_2(2AL_2^2 - 2BL_0 + (B - AL_0)L_2)]}{2A_m} + \frac{L(2B\pi D + AL\pi D - 2d\pi k_m \omega_m + d\pi\xi\sigma_{s0}(2 - \frac{L}{L_0'}))}{2A_m} \quad (16)$$

由于等沉面处桩的沉降量与桩间土的沉降量相等, 故以等沉面为分界面, 可得以下两个变形协调方程:

$$S_{s1} = S_{p1} + \delta_1 \quad (17)$$

$$S_{s2} = S_{p2} + \delta_2 \quad (18)$$

式中: S_{s1} 、 S_{s2} 分别为等沉面上、下桩间土弹性压缩变形量, m; S_{p1} 、 S_{p2} 分别为等沉面上、下桩弹性压缩变形量, m; 其余同上。

褥垫层作为桩顶及桩周土体的荷载缓冲区域, 其厚度相较于桩-土复合地基较薄, 此处近似按单向弹性压缩计算桩顶向上刺入褥垫层的深度, 刺入变形量因桩与桩间土的压力差值产生。

$$\delta_1 = c_c(\sigma_m - \sigma_s) \quad (19)$$

将式(11)、(13)、(17)代入式(19), 两边同时除以 σ_{s0} , 得桩土应力比 n 的表达式:

$$n_{1上} = \frac{\sigma_{m0}}{\sigma_{s0}} = 1 + \frac{d\pi\xi[E_{m1}(3-L_0)L_0^2 + (L_1-3)L_1^2 + E_{m2}(-L_1^3 + 3L_1^2L'_0)]}{6A_mE_{m1}E_{m2}L'_0} - \frac{d\pi k_m\omega_m[E_{m2}L_1^2 + E_{m1}(L_0^2 + L_1^2)L'_0]}{2A_mE_{m1}E_{m2}L'_0} + C_x \quad (20)$$

桩端向下刺入下卧层是由加芯桩复合地基桩端岩土体在桩-土之间压应力差值作用下的沉降量。由于地基土中下卧层的厚度较大,桩端刺入

下卧层时为桩体提供了有效的反力来抵消荷载应力,为了简化计算,桩端刺入下卧层深度按照弹性半无限体上圆形刚性板沉降公式计算:

$$\delta_2 = c_d(\sigma_{mL'} - \sigma_{sL'}) \quad (21)$$

同理将式(12)、(14)及(17)代入式(21)两边同时除以 σ_{s0} ,可得桩土应力比 n_1 的表达式:

$$n_{2上} = 1 + \frac{(L-L_0)\beta_s}{c_dE_{s2}} + \frac{d\pi\xi(-L_0^2 + L_2^2)}{2A_mc_dE_{m3}L'_0} + \frac{-\xi L_2^3 - 3d\pi\xi L_2^2L'_0 + L^2(L\xi + 3d\pi\xi L'_0)}{6A_mc_dE_{m4}L'_0} + C_Y \quad (22)$$

其中式(20)和式(22)中 C_x 、 C_Y 为常数项,整理得到关于等沉面深度 l_0 的一元三次方程:

$$a_1l_0^3 + b_1l_0^2 + c_1l_0 + d_1 = 0 \quad (23)$$

式中:系数 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 分别为

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{d\pi\xi}{6A_mE_{m2}L'_0} \\ b_1 &= \frac{d\pi(c_dE_{p3}\xi E_{m1} + E_{m1}(\xi E_{m2} - c_dE_{m3}k_m\omega_mL'_0))}{2A_mc_dE_{m1}E_{m2}E_{m3}L'_0} \\ c_1 &= \frac{\beta_s}{c_dE_{s2}} \\ d_1 &= -\frac{d\pi k_m\omega_mE_{m1}L_1^2L'_0}{2A_mE_{m1}E_{m2}L'_0} + \frac{d\pi\xi[(L_1-3)L_1^2 + E_{m2}(-L_1^3 + 3L_1^2L'_0)]}{6A_mE_{m1}E_{m2}L'_0} - \frac{d\pi k_m\omega_m[E_{m2}L_1^2 + E_{m1}(L_1^2L'_0)]}{2A_mE_{m1}E_{m2}L'_0} - \frac{L\beta_s}{c_dE_{s2}} - \frac{d\pi\xi L_2^2}{2A_mc_dE_{m3}L'_0} - \frac{3d\pi\xi(L^2 - L_2^2)L'_0}{6A_mc_dE_{m4}L'_0} \end{aligned} \quad (24)$$

根据一元三次方程的求根公式及等沉面深度 L_0 的取值范围(0, L),即可求解等沉面深度 L_0 ,代入式(20)或式(22)便可得到长芯桩上部桩体桩顶面的桩土应力比 $n_{1上}$ 。

3.3 长芯桩下部桩体

芯桩为刚性体,下部凸出芯桩部分,桩身与桩周土体的侧阻分布模式为线性分布。其承担的上部竖向荷载应力直接传递至桩底,桩身侧摩阻力直接传递给土体,均布荷载可以直接作用于桩端,并随着桩端刺入持力层而发挥承载作用。在线性侧阻分布模式下,下部刚芯桩体与桩周土体也存在等沉面。

通过对长芯桩下部土体单元进行受力分析,如图5所示,等沉面以上桩周土体与桩体的竖向受力满足以下关系:

$$A_{ps}\sigma_{sz} - A_{ps}(\sigma_{sz} + d\sigma_{sz}) + \pi D\tau_s d_z = 0 \quad (25)$$

式中: A_{ps} 为复合地基芯桩处理面积, m^2 ; σ_{sz} 为上

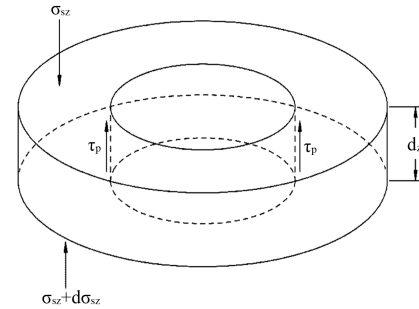


图5 长芯桩下部土体环单元受力示意

部荷载引起的沿深度方向上部加芯水泥土搅拌桩桩底附加应力, kPa ; τ_s 为桩侧向摩阻力, kPa ; 其余同上,沿深度方向的分布规律满足式(3)。

令, 化简为:

$$\text{令 } a = \frac{\pi D}{A_{ps}}, \text{ 化简为: } \frac{d\sigma_{sz}}{dz} = -a\tau_s \quad (26)$$

同理,对芯桩部分进行芯桩微分单元受力分析,如图6所示。

可得芯桩单元体竖直向下受力平衡微分方程:

$$A_{pp}\sigma_{pz} - A_{pp}(\sigma_{pz} + d\sigma_{pz}) - \pi d\tau_s dz = 0 \quad (27)$$

$$\text{令 } b = \frac{\pi d}{A_{pp}}, \text{ 化简为: } \frac{d\sigma_{pz}}{dz} = b\tau_s \quad (28)$$

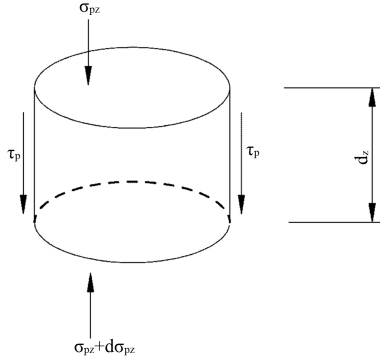


图 6 长芯桩下部芯桩单元受力示意

联立式(3), (25), (27), 积分得到各区段桩周土与桩身竖向应力

各段土体竖向应力:

$$\sigma_{sz} = \begin{cases} a\xi\sigma_s\left(\frac{z^2}{2L'_0} - z\right) + C_1 & L \leq z \leq L'_1 \\ a\xi\sigma_s z + C_2 & L'_1 \leq z \leq L' \end{cases} \quad (29)$$

各段桩体竖向应力:

$$\sigma_{pz} = \begin{cases} b\xi\sigma_s\left(z - \frac{z^2}{2L'_0}\right) + C_3 & L \leq z < L'_1 \\ -b\xi\sigma_s z + C_4 & L'_1 \leq z \leq L' \end{cases} \quad (30)$$

由应力连续性边界条件: 当 $z = L$ 时, $\sigma_{sz} =$

σ_s , $\sigma_{pz1} = \sigma_p$;

$z = L'_0$ 时, $\sigma_{sz2} = \sigma_{sz1}$, $\sigma_{pz1} = \sigma_{pz2}$, 解得 $C_1 \sim C_4$, 如下:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{-aL^2\xi\sigma_s + 2aL\xi\sigma_s L'_0 + 2\sigma_s L'_0}{2L'_0} \\ C_2 &= \sigma_s - a\xi\sigma_s L'_1 - \frac{a\xi\sigma_s(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1)}{2L'_0} \\ C_3 &= \sigma_p + b\xi\sigma_s\left(\frac{L^2}{2L'_0} - L\right) \\ C_4 &= \sigma_p + b\xi\sigma_s\left(2L'_1 + \frac{L^2 - L'^2_1}{2L'_0} - L\right) \end{aligned} \quad (31)$$

则各区段桩周土体、桩体的竖向应力为

$$\sigma_{sz} = \begin{cases} a\xi\sigma_s\left(\frac{z^2}{2L'_0} - z\right) + \frac{-aL^2\xi\sigma_s + 2aL\xi\sigma_s L'_0 + 2\sigma_s L'_0}{2L'_0} & L \leq z < L'_1 \\ a\xi\sigma_s(z - L'_1) - \frac{a\xi\sigma_s(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1)}{2L'_0} & L'_1 \leq z \leq L' \end{cases} \quad (32)$$

$$\sigma_{pz} = \begin{cases} b\xi\sigma_s\left(z - \frac{z^2}{2L'_0}\right) + \sigma_p + b\xi\sigma_s\left(\frac{L^2}{2L'_0} - L\right) & L \leq z < L'_1 \\ -b\xi\sigma_s z + \sigma_p + b\xi\sigma_s\left(2L'_1 + \frac{L^2 - L'^2_1}{2L'_0} - L\right) & L'_1 \leq z \leq L' \end{cases} \quad (33)$$

等沉面以上和以下桩间土体压缩变形量为等沉面以上土体压缩:

$$S_{su} = \int_L^{L'_1} \frac{\sigma_{sz1}}{E_{s1}} dz = -\frac{\sigma_s(L - L'_0)(L^2(a\xi - 3a\xi) + (6 - 2a\xi L + 6aL\xi)L'_0 - 2a\xi(L'_0)^2)}{6E_{s1}L'_0} \quad (34)$$

等沉面以下土体的压缩变形:

$$S_{sd} = \int_{L'_0}^{L'} \frac{\sigma_{sz2}}{E_{s2}} dz = \frac{\sigma_s(L' - L'_0)(-a\xi(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1))}{2E_{s2}L'_0} + \frac{\sigma_s((2 + a\xi(L' + L'_0)) - 2a\xi L'_1)}{2E_{s2}} \quad (35)$$

式中: E_{s1} 为等沉面以上加固区桩间土的压缩模量, MPa; E_{s2} 为等沉面以下加固区桩间土的压缩

模量, MPa。

芯桩为刚度较大的预制钢筋混凝土桩, 在承担上部载荷时只存在应力传递, 不存在压缩变形, 所以芯桩的压缩变形量为 0, 桩顶刺入褥垫层深度 δ_1 , 按照下式计算:

$$\delta_1 = c_c(\sigma_p - \sigma_s) \quad (36)$$

$$c_c = \frac{h_c}{E_c} \quad (37)$$

式中: c_c 为桩顶作用于褥垫层单位压力时竖向刺入变形量 (m/kPa), 芯桩在压应力作用下刺入下卧层的深度 δ_2 由下式计算可得:

$$\delta_2 = c_d(\sigma_{pL'} - \sigma_{sL'}) \quad (38)$$

$$c_d = \frac{1}{K} = \frac{(1 - \mu_0^2)\omega \sqrt{A_d}}{E_0} \quad (39)$$

式中: c_d 为桩端作用于下卧层单位压力时的竖向

刺入变形量, m; K 为桩端土体的基床系数; μ_0 为桩端土体的泊松比; A_d 为桩体的底面积, m^2 ; ω 为沉降影响系数, 由基础底面长宽比确定取值, 此处取 0.7; E_0 为桩底端土体的压缩变形模量, kPa; $\sigma_{sL'}$, $\sigma_{pL'}$ 分别为桩底端处桩周土体及桩体的竖向应力, kPa。

当 $z = L'$ 时, 桩底端处桩周土体的竖向应力为

$$\sigma_{sL'} = a\xi\sigma_s(L' - L'_1) - \frac{a\xi\sigma_s(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1)}{2L'_0} \quad (40)$$

桩底端处桩体的竖向应力为

$$\sigma_{pL'} = \sigma_p + b\xi\sigma_s\left(2L'_1 + \frac{L^2 - L'^2_1}{2L'_0} - L - L'\right) \quad (41)$$

根据式(36) 可得 δ_2

$$\delta_2 = c_d\left(\sigma_p + b\xi\sigma_s\left(2L'_1 + \frac{L^2 - L'^2_1}{2L'_0} - L - L'\right)\right) - a\xi\sigma_s c_d(L' - L'_1) - \frac{a\xi\sigma_s c_d(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1)}{2L'_0} \quad (42)$$

由于芯桩不产生压缩变形, 等沉面以上桩周土体的压缩变形量等于桩顶刺入褥垫层的深度,

等沉面以下桩周土体的压缩变形量等于桩端刺入下卧层深度, 即

$$S_{su} = \delta_1 = \frac{2\sigma_s a\xi L^2(L - L'_0)}{6E_{s1}L'_0} + \frac{\sigma_s[(3 + 2aL\xi) - a\xi L'_0]}{3E_{s1}} = c_c(\sigma_p - \sigma_s) \quad (43)$$

$$S_{sd} = \delta_2 = \frac{\sigma_s(L' - L'_0)(-a\xi(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1))}{2E_{s2}L'_0} + \frac{\sigma_s((2 + a\xi(L' + L'_0)) - 2a\xi L'_1)}{2E_{s2}} =$$

$$c_d\left(\sigma_p + b\xi\sigma_s\left(2L'_1 + \frac{L^2 - L'^2_1}{2L'_0} - L - L'\right)\right) - a\xi\sigma_s c_d(L' - L'_1) - \frac{a\xi\sigma_s c_d(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1)}{2L'_0} \quad (44)$$

由式(41)代入式(34)中, 等式两边同时除以 σ_s , 整理可得:

$$n_{1\text{下}} = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} = 1 + \frac{a\xi L^2(L - L'_0)}{3E_{s1}L'_0} + \frac{3 + a\xi(2L - L'_0)}{3E_{s1}} \quad (45)$$

同理, 将式(42)代入式(36)中, 等式两边同时除以 σ_s , 整理可得:

$$n_{2\text{下}} \frac{\sigma_p}{\sigma_s} = 1 - a\xi(L' - L'_0) + \frac{a\xi(L - L'_0)^2}{2L'_0} - b\xi\left(-L - L' + \frac{L^2}{2L'_0} + \frac{3L'_0}{2}\right) + \frac{(L' - L'_0)(-a\xi(L - L'_1)(L - 2L'_0 + L'_1))}{2c_d E_{s2} L'_0} + \frac{(L' - L'_0)(2 + a\xi(L' + L'_0) - 2a\xi L'_1)}{2c_d E_{s2}} \quad (46)$$

联立式(43)及式(44), 整理得到另一个关于等沉面深度 L'_0 的一元三次方程:

$$a_2 L'^3_0 + b_2 L'^2_0 + c_2 L'_0 + d_2 = 0 \quad (47)$$

根据一元三次方程的求根公式及等沉面深度 L'_0 的取值范围 $(0, L'_0)$, 即可求解等沉面深度 L'_0 , 代入式(43)或式(44)便可得到长芯桩下部桩

体桩顶面的桩土应力比 $n_{\text{下}}$ 。采用叠加原理, 得到长芯水泥土搅拌桩-土应力比计算公式如下:

$$n_p = \frac{V_1 n_{\text{上}} + V_2 n_{\text{下}}}{V_p} \quad (48)$$

式中: V_1 、 V_2 分别为长芯桩上、下部桩体的体积, m^3 ; V_p 为长芯水泥土桩整桩体积, m^3 。

4 室内试验验证

为了验证长芯桩桩土应力比计算公式的合理性，同时分析长芯桩的芯桩长度对复合桩土应力比的影响。课题组设置了长芯搅拌桩桩土应力比测试室内相似模型试验。试验采用不同直径的尼龙棒作为芯桩材料，采用内径为 60 mm 的 PVC 管做磨具，并用流态水泥土浇筑形成长芯水泥土搅拌桩桩体，搅拌桩的长度为 500 mm，并在标准养护室养护 28 d，然后将其埋在预制模型箱中，通过数控加载设备对水泥土复合桩进行加载，采集到芯桩桩顶、水泥土桩桩顶、桩周土顶的竖向应力，得到对应的桩土应力比。通过上述试验分析芯桩桩长、桩径对桩土应力比的影响，同时验证理论公式的合理性。

4.1 芯桩桩长

芯径直径为 2 cm，外桩桩径为 60 cm，芯桩长度分别采用 50、60、70、80 cm，桩号分别为 50D2、60D2、70D2 和 80D2。加载试验级数为 15 级，垫层厚度 10 cm，模拟柔性路堤荷载，芯桩的弹性模量为 1.4 GPa，泊松比为 0.36，水泥土的弹性模量 16.2 MPa，土的弹性模量 8.8 MPa，土的内摩擦角为 29.2°，桩土摩擦角为 22°。加载面积为 400 cm²。试验和计算得到的 2、6、8 kN 荷载条件下的桩土应力比的计算结果如表 2 所示。计算结果表明本文的理论计算结果和文献 [8] 均比实测的小，理论计算模型采用了多种假定条件，与加芯桩的实际状态差别较大。同时可以看出，本文计算方法得到桩土应力比比文献 [8] 的计算结果大，而且接近实际测值。文献 [8] 考虑刚性荷载作用下桩侧阻力线性分布模式计算得到的结果，而本文提供的方法是考虑柔性荷载作用下桩侧阻力分段非线性分布模式下的计算结果，侧阻所提供的承载力较前者大，其在桩顶所承担的荷载也随之增大，对应的桩土应力比也随之变大。所以柔性荷载作用下，需要考虑桩侧阻的分段分布特征对桩土应力比的影响。从表 1 还可以看出，芯桩桩长对桩土应力比有一定的影响，桩土应力比随芯桩桩长的变大而变大。

4.2 芯桩桩径

芯径分别采用直径 2、2.5、3、3.5 cm，外桩

表 2 不同芯桩桩长条件下桩土应力比计算结果对比

桩型	桩顶荷载/kN		
	试验实测	理论计算	文献[8]
50D2	87.5	67.5	57.5
	130.7	107.3	98.6
	150.2	120.2	102.4
60D2	96.5	78.6	66.5
	160.4	133.4	106.5
	174.2	147.2	152.4
70D2	240.2	180.5	164.5
	280.3	224.6	198.4
	310.4	276.4	214.4
80D2	298.4	254.8	188.6
	340.4	302.6	274.4
	380.6	320.8	292.6

桩径为 6 cm，芯桩长度采用 60 cm，桩号分别为 60D2、60D2.5、60D3 和 60D3.5。其余参数同 4.1。试验和计算得到的 2、6、8 kN 得到的桩土应力比的计算结果如表 3 所示。试验结果和计算结果反映出了与桩长影响类似的规律。只是桩径对桩土应力比的影响幅度要大于桩长，因此，在进行加芯桩的结构设计时，应对芯桩的桩长、桩径进行合理优化，确定合理的桩长和桩径可以得到更加经济、安全、合理的结构设计方案。

表 3 不同芯桩桩径条件下桩土应力比计算结果对比

桩型	桩顶荷载/kN		
	试验实测	理论计算	文献[8]
60D2	96.5	78.6	66.5
	160.4	133.4	106.5
	174.2	147.2	152.4
60D2.5	108.4	98.4	76.5
	180.2	154.4	118.4
	206.4	162.4	134.2
60D3	124.6	106.8	88.6
	246.7	198.2	158.2
	280.4	240.2	222.4
60D3.5	188.6	146.8	123.4
	320.2	284.2	226.4
	360.4	306.8	260.4

5 结 论

(1) 采用“截面法”将长芯复合桩沿着搅拌

桩深度划分上部等芯桩和下部刚性桩,上部等芯桩采用考虑柔性荷载作用下的侧阻分段非线性分布特征,下部刚性桩采用线性侧阻分布模式,分别计算上部桩土应力比和下部桩土应力比,采用叠加原理得到长芯复合桩的桩土应力比,试验结果表明,该计算方法是合理可行的。

(2) 与相关文献对比,高填方路堤柔性荷载作用下,加芯搅拌桩桩侧阻力非线性分布模式对桩土应力比的影响是不可忽略的,该分布模式在一定程度上,提高了桩的竖向荷载的分担比,一定荷载条件下的,桩土应力比的计算值比试验值小,说明理论模型的假定条件在一定程度上降低了加芯搅拌桩的荷载分担比。

(3) 芯桩的桩径和桩长能影响一定荷载条件下的长芯复合搅拌桩的桩土应力比,桩径越大、桩长越长,桩土应力比越大,桩长对桩土应力比的影响幅度大于桩径。在进行加芯桩的结构设计时,应对芯桩的桩长、桩径进行合理优化,确定合理的桩长和桩径可以得到更加经济、安全、合理的结构设计方案。

参考文献:

[1] 劲性复合桩技术规程:JGJ/T327—2014[S]. 北京:中

(上接第 6 页)

于软土基坑水平位移统计值 $0.329\%H \sim 2.897\%H$; 圆形地连墙表现为向坑内的挤压变形。

(4) 受基坑内土塞效应和承压水作用的影响,基坑周边地表沉降随着离开基坑的距离增大呈现先增大后减小的趋势,地表沉降最大值为 $0.034\%H$,基坑开挖引起地表沉降的范围为 $0.57H$ 。

参考文献:

- [1] 张世彬. 土塞效应在基坑工程中的研究与应用[J]. 城市道桥与防洪. 2021(8):329-332.
- [2] 赵一行,詹刚毅,石钰锋,等. 某超深圆形基坑受力变形的尺寸效应分析[J]. 华东交通大学学报. 2021, 38(5):23-29.
- [3] 肖潇,李明广,陈锦剑,等. 基坑开挖对围护墙竖向变形的影响机理[J]. 上海交通大学学报. 2018, 52(12):1552-1558.

国建筑工业出版社. 2014.

- [2] 罗强,陆清元. 考虑桩土滑移的路堤下刚性桩复合地基沉降计算[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1):20-30.
- [3] 吕伟华,缪林昌. 刚性桩复合地基桩土应力比计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 624-628.
- [4] 袁杰. 路堤下复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 公路工程, 2015, 40(2):174-177;202.
- [5] 陆清元,罗强,蒋良淮. 路堤下刚性桩复合地基桩-土应力比计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(7):2473-2482.
- [6] 庄乐通. 碎石桩复合地基桩土应力比计算新方法[D]. 广州:广州大学, 2018.
- [7] 叶观宝,蔡永生,张振. 加芯水泥土桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 672-678.
- [8] 朱桃丽,赵桂娥. 考虑桩间土非线性影响的刚性桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2):45-50.
- [9] 姜文雨,刘一. 刚性桩复合地基中性面深度与桩土应力比计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(12):4554-4560.
- [10] 顾士坦,施建勇,王春秋,等. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8):2473-2478.
- [11] 建筑地基处理技术规范:GJG79—2012[S], 北京:中国建筑工业出版社, 2014.

- [4] 冷伍明,姚康,门小雄,等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报. 2023, 20(4):1347-1358.
- [5] 张誉津,刘俊城,谭勇. 深厚富水砂性地层深基坑开挖降水变形特性研究[J]. 隧道建设(中英文). 2023, 43(9):1511-1522.
- [6] 林世杰,付浩,宋二祥,等. 圆形竖井变形特性及其计算分析方法[J]. 地基处理. 2023, 5(3):195-204.
- [7] 张世彬. 土塞效应在基坑工程中的研究与应用[J]. 城市道桥与防洪. 2021(8):329-332.
- [8] 邱树远. 佛山地区软土基坑施工全过程围护结构受力与变形分析[D]. 西安:长安大学, 2021.
- [9] 郑启宇. 上海地区承压含水层降水对深基坑受力变形影响研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.
- [10] 贾曾潘,陈保国. “两墙合一”条件下地铁车站深基坑变形特性[J]. 北京交通大学学报. 2021, 45(3):47-54.