

刚柔组合桩截面优化设计方法

江建坤, 俞涛, 沈群良

(浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要:分析了刚性桩与柔性桩对沉降量的影响。对于柔性桩,随着桩径、桩长的增大,沉降量呈线性减小,桩径的变化对减小沉降量影响更为明显;而由于持力层深度的影响,刚性桩桩长对于沉降量表现出非线性变化的规律。对考虑造价情况下刚柔组合桩优化设计进行了分析,在相同造价情况下,柔性桩、刚性桩桩长增大对控制沉降量的效果优于增大桩径。

关键词:刚柔组合桩;沉降量;截面优化设计

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)S1-0092-04

我国沿海及内地湖泊地区存在许多复杂的软土地基,在其上建设公路或铁路、市政、水利等路基堤坝工程时必须进行加固处理。使用刚柔组合桩进行深厚软基处理往往会取得较好的效果。刚柔组合桩是柔性桩(水泥搅拌桩、高压旋喷桩等)内插刚性桩(预应力管桩、素混凝土桩、CFG桩、Y形桩等)的一种软土地基处理技术^[1-3],柔性桩可等于或小于刚性桩桩长。刚性桩可支承于较深持力层;柔性桩可支承于较浅持力层,也可作为摩擦桩使用。刚柔组合桩技术作为一种新型桩,既具有承载力高、稳定性好及沉降量小等优点,又兼具了刚性桩技术和柔性桩技术,当用于软基处理时,具有复合地基的技术特点。

刚柔组合桩已成功应用于工程实际,学者多基于单桩沉降^[4-6]及单桩承载性能开展研究工作^[7-10],但是对于其组合形式的优化设计研究成果较少。对于刚柔组合桩,单桩截面优化设计包括合理选择柔性桩桩径、柔性桩桩长、刚性桩桩径、刚性桩桩长4个主要方面。

本文根据刚柔组合桩单桩沉降计算算法进行刚柔组合桩截面优化设计。基于沉降计算算法进行不同刚性桩桩径、桩长,不同柔性桩桩径、桩长条件下沉降量计算,分别研究其对沉降计算结果的影响。最后基于造价因素进行了刚柔组合桩截面优化设计。

1 刚柔组合桩单桩沉降计算算法

竖向荷载作用下的桩顶沉降由以下部分组成:

①桩本身的弹性压缩量 S_e ; ②桩侧摩阻力向下传递

引起桩端下土体的压缩量 S_s ; ③桩端阻力引起的桩端下土体的压缩量 S_p ; ④桩端刺入土体的刺入量 $S_{d\Delta}$ 。

则竖向荷载作用下刚柔组合桩单桩的桩顶沉降量为

$$S = S_e + S_s + S_p + S_{d\Delta} \quad (1)$$

1.1 S_e 计算

假定桩侧摩阻力沿桩身均匀分布,根据假定的桩身摩阻力分布可以得到桩身轴力分布:

$$P_1(x) = \begin{cases} P_p - \frac{(1-\alpha)P_p x}{L_r} & 0 \leq x \leq L_f \\ P_p - (1-\beta)\alpha P_p - \frac{(1-\alpha)P_p x}{L_r} & L_f < x \leq L_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_f 为柔性桩桩长; L_r 为刚性桩桩长; x 为距桩顶距离; α 为刚柔组合桩桩端承担的荷载比; β 为圆形刚性桩极限桩端阻力承担刚柔组合桩极限端阻力的比值; P_p 为桩顶荷载。

将桩看成是弹性体,对于柔性桩部分,桩侧摩阻力产生桩身压缩采用复合模量

$$E_1 = \frac{E_r A_r + E_f A_f}{A_r + A_f}$$

则其弹性压缩量为

$$S_{e1} = \int_0^{L_f} \frac{P_1(x)}{E_1 \pi R_f^2} dx + \int_{L_f}^{L_r} \frac{P_1(x)}{E_r \pi R_r^2} dx \quad (3)$$

其中 $A_r = \pi R_r^2$ $A_f = \pi(R_r^2 - R_f^2)$

式中: E_1 为柔性桩桩长范围内刚柔组合桩的复合弹

性模量; R_r 、 R_f 分别为刚性桩、柔性桩外包圆半径; A_r 、 A_f 为刚性桩、柔性桩界面计算面积; E_r 、 E_f 分别为刚性桩、柔性桩桩身压缩模量。

假定桩侧摩阻力沿桩身线性增长, 根据假定的桩身摩阻力分布可以得到桩身轴力分布:

$$P_2(x) = \begin{cases} P_p - \frac{(1-\alpha)P_p x^2}{L_r^2} & 0 \leq x \leq L_f \\ P_p - (1-\beta)\alpha P_p - \frac{(1-\alpha)P_p x^2}{L_r^2} & L_f < x \leq L_r \end{cases} \quad (4)$$

将桩看成是弹性体, 则其弹性压缩量为

$$S_{e2} = \int_0^{L_f} \frac{P_2(x)}{E_f \pi R_f^2} dx + \int_{L_f}^{L_r} \frac{P_2(x)}{E_r \pi R_r^2} dx \quad (5)$$

1.2 S_s 和 S_p 的计算

桩侧摩阻力和桩端阻力引起的土体压缩量为

$$S_0 = S_s + S_p$$

S_0 采用规范^[11]推荐的分层综合法计算。

均匀分布桩侧摩阻力向下传递引起桩端下土体的压缩量记为 S_{s1} ; 线形增长桩侧摩阻力向下传递引起桩端下土体的压缩量记为 S_{e2} 。

假定桩侧摩阻力沿桩身均匀分布, 则

$$S_{01} = S_{s1} + S_p =$$

$$\Psi_p \sum_{j=1}^{m_0} \frac{\Delta h_j}{E_{s_j,i}} \left[\frac{Q_{fs} I_{fs,j} + Q_{fp} I_{fp,j}}{L_r^2} + \frac{Q_{rs} I_{rs,j} + Q_{rp} I_{rp,j}}{L_r^2} \right] \quad (6)$$

$$\text{其中 } Q_{fs} = \frac{\alpha L_r P_p}{L_r + L_f} \quad Q_{fp} = (1-\beta)(1-\alpha)P_p$$

$$Q_{rs} = \frac{\alpha L_r P_p}{L_r + L_f} \quad Q_{rp} = \beta(1-\alpha)P_p$$

式中: S_{01} 为桩侧摩阻力沿桩身均匀分布, 桩端阻力和侧阻力引起的桩端土体压缩量, mm; S_{02} 为桩侧摩阻力沿桩身线性增长, 桩端阻力和侧摩阻力引起的桩端土体压缩量, mm; $E_{s_j,i}$ 为桩端平面下第 j 层土第 i 个分层在自重应力至自重应力加附加应力作用段的压缩模量, MPa; n_j 为桩端平面以下压缩层范围内土层数; Δh_j 为桩端平面下第 j 层土厚度, m; Q_{fs} 、 Q_{fp} 、 Q_{rs} 、 Q_{rp} 分别为柔性桩桩侧摩阻力承担荷载、柔性桩桩端阻力承担荷载、刚性桩桩侧摩阻力承担荷载、刚性桩桩端阻力分担荷载; $I_{fs,j}$ 、 $I_{fp,j}$ 、 $I_{rs,j}$ 、 $I_{rp,j}$ 分别为柔性桩桩侧摩阻力、柔性桩桩端阻力、刚性桩桩侧摩阻力、刚性桩桩端阻力在桩端平面以下第 j 层土层产生的平均竖向附加应力系数, 可取第 j 层土层中点处的附加应力系数; Ψ_p 为桩基沉降计算经验系数, 无当地工程的实测资料统计值时, 参照规范^[11]的数值; α 无实测资料及地区经验时可取为 5%。

1.3 $S_{d\Delta}$ 的计算

假设地基土为文克尔地基, 则

$$S_{d\Delta} = \frac{\alpha P_p}{A_R k} \quad (7)$$

式中: k 为基床反力系数, kN/m³, 本文取 3×10^4 kN/m³。对于刚柔组合桩桩端刺入量为 20.3 mm。

1.4 刚柔组合桩单桩桩顶沉降量计算

桩身侧摩阻力均匀分布时, 刚柔组合桩单桩的桩顶沉降量为

$$S_1 = S_{e1} + S_{01} + S_{d\Delta} \quad (8)$$

桩身侧摩阻力线性增长时, 刚柔组合桩单桩的桩顶沉降量为

$$S_2 = S_{e2} + S_{02} + S_{d\Delta} \quad (9)$$

2 计算条件

使用别列赞夫法进行桩端极限承载力计算, 对于柔性桩为桩径 900 mm, 桩长 10 m, 刚性桩桩径 400 mm, 桩长 25 m 的刚柔组合桩, 当桩周土侧摩阻力平均值为 17.6 kPa 时, 柔性桩桩端极限承载力值约为 165.479 kN, 刚性桩桩端极限承载力值约为 76.6 kN, 桩身承受总极限侧摩阻力为 828.96 kN, 单桩承受极限总荷载为 1038.346 kN。柔性桩桩端极限承载力与刚性桩桩端极限承载力之和约占总承载力的 20.2%, 侧摩阻力承担荷载占总荷载的 79.8%。根据以上计算结果假定, 在上覆荷载作用下, 桩侧土体侧摩阻力首先完全发挥, 剩余荷载由柔性桩桩端和刚性桩桩端共同承担, 具体承担荷载根据不同情况下柔性桩桩端极限承载力与刚性桩桩端极限承载力的比值进行分担。

JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》桩基计算深度 z_n 按应力比确定, 即计算深度处的桩引起的附加应力 σ_z 与土的自重应力 σ_c 应满足:

$$\sigma_z \leq 0.2\sigma_c \quad \sigma_z = \sum_{j=1}^m \alpha_j p_{0j}$$

式中: α_j 为附加应力系数。

当柔性桩、刚性桩桩端土体及桩侧摩阻力达到极限状态时, 对本文的刚柔组合桩形式进行计算, 取计算深度为 36 m, 第 4 层桩端下 0.6 m 粉质黏土分为 0.15 m 每层进行计算, 第 5 层粉质黏土计算层厚度取 0.8 m, 最终计算出引起的桩端沉降量为 17.92 mm, 桩身压缩量为 2.46 mm, 桩端刺入量为 20.3 mm, 则单桩总沉降量为 40.68 mm。

目前常用的刚柔组合桩参数为: 柔性桩截面半径 $R_f = 0.45$ m, 刚性桩截面半径 $R_r = 0.2$ m, 柔性桩桩长 $L_f = 10$ m, 刚性桩桩长 $L_r = 25$ m。

在进行沉降量计算时, 假设桩侧极限摩阻力首先

全面发挥,剩余荷载由柔性桩桩端和刚性桩桩端共同分担。其分担比例与桩端极限承载力的比例相同。

2.1 柔性桩对刚柔组合桩沉降性能的影响

为进行不同柔性桩组合下刚柔组合桩单桩沉降性能的对比,需假设不同桩型上部作用相同荷载。

为进行不同桩型在荷载作用下的单桩沉降性能比较,综合考虑单桩极限承载力以及单桩极限侧摩阻力情况,取上覆荷载 970 kN 情况进行计算。

通过变换柔性桩桩长与桩径来研究其对刚柔桩单桩沉降量的影响,其计算结果如图 1 所示。

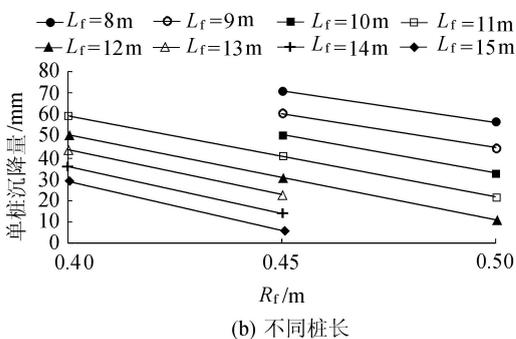
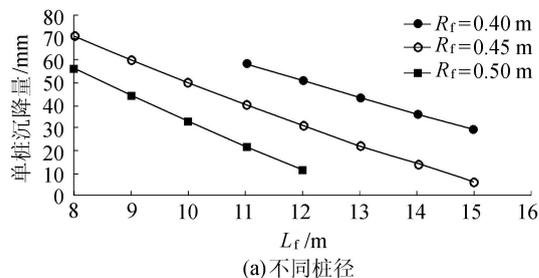


图 1 柔性桩单桩沉降量随桩长和桩径变化

柔性桩桩长为 23 m、25 m 情况下单桩沉降量较大,其单桩压缩量较大,未将其画入图 1。从图 1 可以看出,当刚柔桩上部柔性桩桩长与桩径分别变化时单桩沉降计算呈直线减小。当 $R_f = 0.40$ m 时,每增大单位桩长,相应的单桩沉降量平均减少 7.49 mm;当 $R_f = 0.50$ m 时,每增大单位桩长相应的单桩沉降量平均减少 8.60 mm;当 $R_f = 0.60$ m 时,每增大单位桩长相应的单桩沉降量平均减少 11.37 mm。随着桩径的增大,单位桩长产生的平均沉降减少量也呈线性增加。

当桩长为 8 ~ 12 m, R_f 由 0.45 m 增大到 0.50 m 时,单桩沉降减少量分别为 14.55 mm、15.98 mm、17.32 mm、18.60 mm、19.80 mm;当桩长为 11 ~ 15 m, R_f 由 0.40 增大到 0.45 时,单桩沉降量分别减少约 18.58 mm、19.78 mm、20.92 mm、22.00 mm、23.037 mm。

2.2 刚性桩对沉降性能的影响

当 $R_r = 0.20$ m, 桩长由 23 m 变为 24 m 时,刚性桩桩端承载力分担更多,其产生的沉降量突然变大,主要原因在于桩侧土压力与桩端阻力的增大,且在

深度 22.8 ~ 25.6 m 处存在较软弱地基。

由图 2 可见,刚性桩桩径的增加对于沉降起到明显的效果,桩长分别为 23 m 和 24 m 时, R_r 桩径由 0.20 m 增大到 0.30 m,使得沉降量分别减少 31.42 mm 和 51.78 mm。

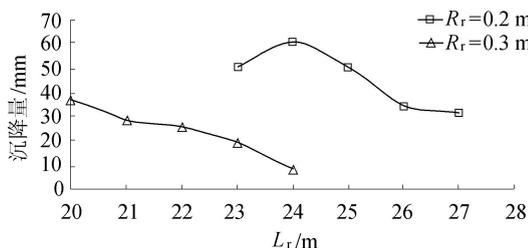


图 2 不同刚性桩桩径情况下单桩沉降量随桩径变化

3 考虑造价情况下刚柔桩单桩优化设计

对于柔性桩,取半径 0.30 m 时造价为 50 元/m;半径 0.40 m 时造价为 87 元/m;半径 0.45 m 时造价为 110 元/m;半径 0.50 m 时造价为 136 元/m。

对于刚性桩,取半径 0.1 m 时造价 50 元/m;半径 0.2 m 时造价为 125 元/m;半径 0.3 时造价 200 元/m。

刚柔桩不同组合情况造价计算结果见表 1 和表 2,柔性桩设置时刚柔组合桩单桩造价-沉降量对比见图 3。

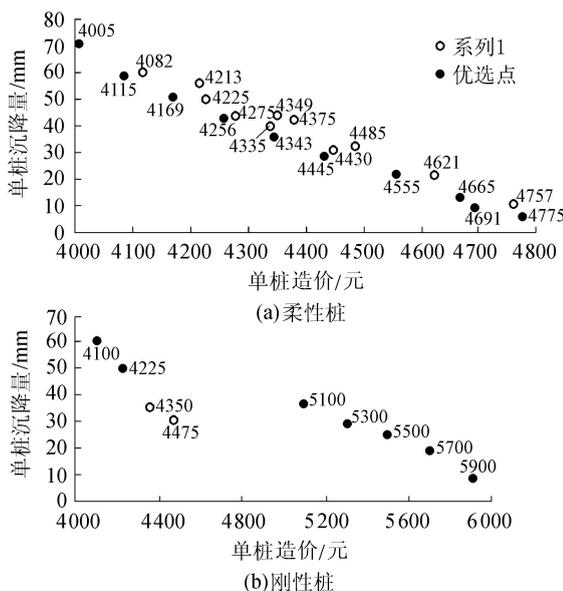


图 3 设置刚柔组合桩时单桩造价-沉降量对比

对比不同柔性桩设置,针对产生的沉降量大小进行筛选,选取各个段落中产生沉降量相似的最小造价,如图 3 中黑色圆点表示,因此可以发现对于柔性桩增大桩长为最有效手段。

对于刚性桩,因刚性桩的变化对单桩承载力影响较大,因此在比较过程中与施加荷载小于单桩极限荷载并且大于桩侧极限摩阻力的情况相比数据较少。不过针对该部分数据进行计算,也不难发现

表1 设置不同柔性桩时刚柔组合桩单桩造价

桩半径/m	造价/元										
	桩长 8 m	桩长 9 m	桩长 10 m	桩长 11 m	桩长 12 m	桩长 13 m	桩长 14 m	桩长 15 m	桩长 18 m	桩长 23 m	桩长 25 m
0.40				4082	4169	4256	4343	4430		4275	4375
0.45	4005	4115	4225	4335	4445	4555	4665	4775	4691		
0.50	4213	4349	4485	4621	4757						

表2 设置不同刚性桩时刚柔组合桩单桩造价

桩半径/m	造价/元								
	桩长 20 m	桩长 21 m	桩长 22 m	桩长 23 m	桩长 24 m	桩长 25 m	桩长 26 m	桩长 27 m	
0.20				3975	4100	4225	4350	4475	
0.30	5100	5300	5500	5700	5900				

其中规律。在图3(b)中可看出2种设置方式情况下产生的沉降量相差不大,但是造价相差较大,经比较发现,对于刚性桩,与柔性桩类似,在相同造价的情况下加大桩长比增大直径更加有效。

在某工程中刚柔组合桩形式为柔性桩桩半径为0.45 m,桩长为10 m,刚性桩桩半径为0.20 m,桩长为25 m,单桩总造价为4225元。在造价基本不变情况下,对比柔性桩设置对单桩影响效果,可设置柔性桩为桩半径为0.40 m,桩长13 m,此时单桩总造价为4256元,但是单桩沉降量可减少6.93 mm。因此,在计算段落情况下,刚柔组合桩设计存在一定优化空间。

4 结论

a. 基于沉降对刚柔组合桩进行了影响因素分析,柔性桩桩径变化,对减少沉降的影响更为明显,柔性桩桩径、桩长对沉降影响基本呈线性变化。

b. 因刚性桩多达到持力层深度,因此本文计算呈现刚性桩桩长对沉降的影响更表现出非线性变化的规律。

c. 开展了考虑造价情况下刚柔桩优化设计分析,在相同造价情况下,柔性桩、刚性桩桩长增大对控制沉降的效果优于增大桩径;在实际工程设计中,柔性桩桩径、桩长的设置存在较大优化空间。如:在单桩造价基本相同情况下,刚性桩桩半径为0.20 m、桩长为25 m,若柔性桩为桩半径为0.40 m、桩长为13 m,比柔性桩桩半径为0.45 m、桩长为10 m时沉降量可减少10 mm左右。

参考文献:

[1] 陈昌富,王程亮. 刚-柔性桩复合地基在杂填土地基中的应用[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,2009(增刊1):278-280.

[2] 丁继辉,徐成杰,袁满. 刚柔组合桩复合地基承载力可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2007(增刊1):1314-1318.

[3] 谢新宇,陈洪波,夏建中,等. 预制管桩-搅拌桩组合加固深厚软基性状分析[J]. 建筑结构学报,2007(4):123-127.

[4] 葛忻声,温育琳,龚晓南. 刚柔组合桩复合地基的沉降计算[J]. 太原理工大学学报,2002(6):647-648.

[5] 吴雄志,李红艳. 刚性基础上柔性桩复合地基的沉降计算[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2009(4):4-7.

[6] 张世民. 深厚软土中刚柔复合桩基沉降计算及设计分析[D]. 杭州:浙江大学,2004.

[7] 许红. 刚性基础下长短桩复合地基承载力试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2007.

[8] 朱奎,魏纲,徐日庆. 刚-柔性桩复合地基中桩荷载传递规律试验研究[J]. 岩土力学,2009(1):201-205.

[9] 朱奎,徐日庆. 有无褥垫层刚-柔性桩复合地基性状对比研究[J]. 岩土工程学报,2006(10):1230-1235.

[10] 朱奎,徐日庆,郭印. 刚-柔性桩复合地基中承载性状原位试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2008(1):72-76.

[11] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].

(收稿日期:2013-01-07 编辑:胡新宇)

