

复合载体夯扩桩的设计与计算

杨启安 葛宝亮

张子杰

(北京波森特岩土工程有限公司 102218) (河北工程技术高等专科学校 沧州 061001)

[摘要] 复合载体夯扩桩是一种不同于传统桩基础的技术,其设计计算与普通桩基础也不一致。对复合载体夯扩桩桩距、桩径、桩长的确定方法进行了介绍,并详细介绍了单桩承载力及其沉降计算。

[关键词] 复合载体夯扩桩 单桩承载力 沉降 持力层 优化设计

Design and Calculation of the Ram-compaction Piles with Composite Bearing Base/Yang Qi'an¹, Ge Baoliang¹, Zhang Zijie²(1 Beijing Puissant Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102218, China; 2 Hebei Engineering and Technical College, Cangzhou 061001, China)

Abstract: The ram-compaction pile with compisite bearing base is a new technique. The design and calculation of it are different from those of traditional piles. It introduces how to calculate the distance between piles, the diameter and length of piles, and sumarrizes the calculation of the bearing capacity and settlement of the piles.

Keywords: ram-compaction piles; compisite bearing base; bearing capacity; settlement; bearing soil layer; optimization design; calculation

一、引言

复合载体夯扩桩是通过特殊设备对深层土体进行填料挤密,形成复合载体,上部荷载通过桩身传递到载体再扩散到深层土体。从受力上分析,复合载体相当于等效扩展基础。复合载体夯扩桩与传统桩型的设计方法不同,传统桩基础的设计主要是根据上部结构荷载和建筑物对变形的要求确定桩径、桩长;复合载体夯扩桩的设计除了对桩型的选择外,还包括对加固土层和持力土层位置的确定、三击贯入度等参数的控制。

二、复合载体夯扩桩的选型

复合载体夯扩桩将其上部荷载通过桩身传递到载体(等效扩展基础),再进一步传递到载体下端持力层土体,故设计计算时可将桩等效为传力杆件(柱),将单桩设计简化为桩身传力杆设计和下部扩展基础的设计。设计内容包括桩间距的确定(传力杆件间距的确定)和等效扩展基础的设计,而等效扩展基础的设计主要受埋深和三击贯入度等影响,故可以将复合载体的设计用下式表示:

$$D = F(L, A_e, d) \quad (1)$$

式中 L 为桩间距(m), A_e 为等效计算面积(m²), d 为等效基础埋深(m)。

同一工程既可选择大间距、埋置深的载体基础,也可选择间距小、埋深浅的载体基础。对复合载体夯扩桩的设计即为选择最佳间距、埋深和等效计算面积 A_e ,使工程造价最低。由于这三者在施工中相互影响和制约,桩型的选择除了要考虑设计方案的经济性外,

还要考虑复合载体夯扩桩的施工因素,若桩型选择不当会造成施工困难,增加施工成本。

复合载体夯扩桩的选型主要为桩间距和承台(梁)下桩数量的确定。桩间距不宜太小,桩间距太小,施工时除影响相邻桩的桩身施工质量外,还容易造成邻近桩的载体与桩身的结合不良而影响承载力;桩间距也不宜过大,桩间距过大时,承台冲切弯矩增大,承台厚度相应增加,不利于优化设计。一般复合载体夯扩桩间距约为 1.5~2.2m。设计中通常先根据底板的基础形式和桩间距初步确定单桩承载力,根据土层地质资料初步确定载体底部持力层,假定一个三击贯入度控制指标估算单桩承载力,并与单桩设计承载力进行对比。当估算承载力大于设计要求时,适当增加三击贯入度,或增大桩间距,提高单桩设计承载力;当估算承载力小于设计单桩承载力时,适当减小三击贯入度控制值,或减小桩间距,降低单桩设计承载力。若以上方法都不能满足设计要求时,可以对所选择的持力层深度进行调整。

三、设计桩长的确定

复合载体夯扩桩设计桩长的确定主要考虑上部结构荷载和桩端土层情况两个因素。既要满足上部结构的荷载要求,还要便于施工。

复合载体夯扩桩持力层可以为可塑~硬塑状态的粘性土以及粉土、砂土、碎石土,而载体所在的加固土层可以为经过确定为稳定的所有土层。当软塑状态的粘性土、素填土、杂填土和湿陷性黄土经过试验确定为

稳定可靠的土层时也可作为桩端被加固土层。

由于复合载体夯扩桩由桩身与复合载体两部分组成,故复合载体夯扩桩桩长分为有效桩长和实际桩长,实际桩长为有效桩长与载体深度之和,载体下端土体为复合载体持力层,载体所在土层为加固土层,如图1所示。

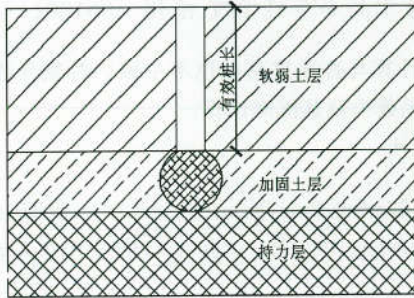


图1 复合载体夯扩桩

普通桩基设计桩长的确定主要考虑桩侧摩阻力和桩端持力层,而复合载体夯扩桩桩长的确定主要考虑持力层土性和有效桩长(等效深基础的等效计算深度)。有效桩长最终应通过计算来确定,当计算承载力不满足设计要求时,在不影响施工质量的情况下可以通过调整三击贯入度或持力层深度达到设计承载力的要求。对于砂土,三击贯入度控制取值一般为10~15cm;对于粘性土,三击贯入度控制取值一般为15~25cm。由于复合载体夯扩桩承载力的计算采用地基土修正后的承载力,而地基土每一层并不在一个标高,是起伏变化的,故复合载体夯扩桩的设计桩长并非一个常数,是随土层变化的。实际施工时,桩长以达到设计持力层作为控制标准,设计验算单桩承载力应以土层最不利的钻孔处的土层进行计算。

四、单桩承载力设计

1. 单桩竖向承载力计算

根据规程^[1],复合载体夯扩桩的单桩竖向承载力特征值计算公式:

$$R_a = u_p \sum q_{sia} l_i + q_{pa} A_e \quad (2)$$

式中 q_{sia} 为桩侧阻力(kPa), q_{pa} 为复合载体下地基土经深度修正后的地基土体承载力特征值(kPa), A_e 为等效计算面积(m²)。

(1) 桩侧阻力 q_{sia}

对于普通桩基来说, q_{sia} 是单桩承载力的一个很重要的因素。对于复合载体夯扩桩,由于其特殊的扩展基础受力形式,其主要承载力由载体基础承受,大量的计算与施工经验证明,复合载体夯扩桩桩侧的 q_{sia} 较小,复合载体夯扩桩基础的受力和变形主要依靠等效扩展基础下土体的受力和变形,且考虑承台下群桩的

相互影响,在计算单桩承载力时桩侧摩阻力一般可以不予计算,即取 $u_p \sum q_{sia} l_i = 0$ 。

(2) 载体基础下地基土承载力特征值 q_{pa}

q_{pa} 为复合载体下持力层地基土经深度修正后的地基承载力特征值,即为等效扩展基础下地基土承载力特征值。对于地基土承载力的修正深度并非是桩长本身的修正,而是建筑物基底埋深与桩长深度之和,如图2所示,承载力深度修正计算按现行地基规范:

$$f_a = f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (3)$$

式中: η_d 为地基承载力深度修正系数; γ_m 为载体基础计算深度以上地基土的加权平均重度,地下水以下取浮重度(kN/m³); d 为等效基础埋置深度, $d = d_1 + d_2 + L + L_1$, L_1 根据地质情况和填料略有差异,经大量数据统计分析,一般取 $L_1 = 2.0$ m。对于单桩承载力,计算时只考虑深度修正,而不考虑载体基础的宽度修正。

基础埋深 d_1 一般自室外地坪面算起。在填方整平地区可自填土地面算起,但填土在上部结构施工完成后时,应从天然地面标高算起。对于地下室采用箱形基础或筏基时,基础埋深深度自室外地面标高算起,采用独立基础或条形基础时从室内地面算起。当建筑物存在主裙楼一体结构,主楼结构承载力修正时的 d_1 可以按基础底面以上范围内的荷载按基础两侧的超载考虑,当超载宽度大于基础宽度的两倍时,将基础折算成土层厚度作为基础埋深,基础两侧超载宽度不等时,取折算深度中较小的值。

(3) 等效计算面积 A_e

复合载体等效计算面积即为载体等效基础的计算面积。由于复合载体夯扩桩与普通夯扩桩受力机理与施工方法不同,其等效计算面积也不一致。普通夯扩桩施工过程中采用提护筒夯击挤压混凝土,形成混凝土扩大头。复合载体夯扩桩的载体采用填料夯击桩端土体密实后形成,故载体的形成来源于重锤对桩端土体的夯击挤密,其面积的确定要考虑桩端下的挤密土体和影响土体,这是复合载体夯扩桩与普通夯扩桩的最大区别。对于不同的土体,由于土性不同,施工中扩展基础的施工也不同。砂土、粉土由于挤密效果较好,可以充分利用其挤密效应,成孔到设计标高后少填料或不填料进行夯击,通过夯击产生的应力波在土体中扩散,使土体颗粒重新排列密实,达到良好的挤密效果和较高承载力;对于含水量高的粉质粘土或粘土,适当填料可以提高土体密实度,当填料和夯击能量过大时,施工中容易造成土体结构破坏,降低土体的承载力,也容易形成橡皮土而影响对土体的挤密效果。故对于该类土应控制填料,合理利用干硬性混凝土对桩端的扩

底作用。

等效计算面积 A_e 并没有精确的计算公式,但与三击贯入度密切相关,规程 JGJ/T135—2001 中给出了不同土性中三击贯入度为 10, 20 和 30cm 对应的桩径为 $\phi 410\text{mm}$ 的复合载体夯扩桩桩端的等效计算面积,见表 1。当设计三击贯入度介于 10cm 和 30cm 之间时,可以采用插入法进行计算,当设计三击贯入度小于 10cm 时,等效计算面积可以选用三击贯入度为 10cm 的等效计算面积乘以增大系数。具体增大系数的值应根据当地地质情况和设计经验而定。表 1 给出的三击贯入度为锤重 35kN, 提升 6.0m 后自由落体的贯入深度,当实际施工时锤重与标准锤重有差别时,应调整落距,使冲击能量与标准重锤冲击能量一致来测量三击贯入度。

等效桩端计算面积(m²) 表 1

被加固土层土性		三击贯入度(cm)		
		10	20	30
粘土		1.6~1.9	1.4~1.8	1.3~1.6
粉质粘土	$0.75 < I_L \leq 1.0$	2.3~2.6	2.1~2.5	1.8~2.3
	$0.25 < I_L \leq 0.75$	2.2~2.5	1.8~2.3	1.6~2.2
	$0.0 < I_L \leq 0.25$	2.0~2.3	1.7~2.2	1.5~2.0
粉土	$e > 0.8$	1.8~2.1	1.6~2.0	1.5~1.9
	$0.7 < e \leq 0.8$	1.7~2.0	1.6~1.9	1.5~1.8
	$e \leq 0.7$	1.6~1.9	1.5~1.8	1.2~1.7
粉细砂	稍密	1.8~2.0	1.6~1.9	1.4~1.8
	中密	1.6~1.9	1.4~1.7	1.3~1.6
碎石土	稍密	1.5~1.7	1.3~1.6	1.2~1.5

2. 单桩水平承载力计算

桩在水平荷载下的破坏主要有两种:桩身应力超过允许应力而出现桩身强度破坏;桩侧土出现屈服破坏。对于高配筋率的混凝土桩或钢桩,由于桩身抗弯刚度较大,随着荷载增加和桩的水平位移,桩侧土的应力逐渐增大,当应力增大到一定值后桩侧土达到屈服被挤出,出现塑性破坏;当桩配筋率较低时,桩顶的嵌固约束使桩身的最大弯距出现在桩顶以下一定深度处,随着桩顶荷载增加,桩身最大弯距处相继出现屈服而形成塑性铰,桩的承载力达到极限。由于复合载体夯扩桩都按构造配筋,配筋率一般为 0.20% ~ 0.65%,故以桩身强度破坏作为水平承载力的控制参数,其承载力计算公式为:

$$H_{cr} = \frac{\alpha \gamma_m f_t W_0}{\nu_m} (1.25 + 22 \rho_g) \left(1 + \frac{\zeta_N N}{\gamma_m f_t A_n} \right) \quad (4)$$

式中: γ_m 为截面模量塑性系数; f_t 为混凝土抗裂设计强度(N/mm²); W_0 为桩身换算截面的受拉边缘的截面模量(m³); H_0 为水平荷载(N); ν_m 为最大弯距系数; α 为水平变形系数; A_n 为桩身换算面积(m²); ζ_N 为桩

顶轴向力影响系数。

五、桩基的沉降计算和软弱下卧层的验算

1. 沉降计算

对以下三种建筑物,采用复合载体夯扩桩,应进行沉降验算:1) 地基基础设计等级为甲级的建筑物;2) 对沉降有严格要求的建筑物;3) 体型复杂或桩端以下存在软弱土层的乙级建筑物。

普通混凝土灌注桩由于桩身混凝土在荷载作用下变形很小,可以忽略不计,故桩基础沉降计算深度从桩端载体底面开始计算;复合载体夯扩桩由于桩身与普通混凝土桩身一致,桩身变形忽略不计,载体由夯击密实的土体和干硬性混凝土和填料组成,通过实际开挖观测,载体为与桩身相连的一直径约 2~3m 的胶状硬体,刚度很大,故计算时也忽略掉载体的变形,变形计算从复合载体端部开始算起。载体深度一般取 2.0m,沉降计算简图见图 3,按下式计算:

$$s = \psi_s p_0 \sum_{i=1}^n \frac{z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}}{E_{si}} \quad (5)$$

式中: ψ_s 为沉降经验系数,根据地区沉降观测资料及经验确定; n 为桩基沉降计算范围内所划分的土层数; E_{si} 为第 i 层土的压缩模量(MPa); $\bar{\alpha}_{i-1}, \bar{\alpha}_i$ 分别为第 $i-1, i$ 层土地面深度范围内平均附加应力系数。

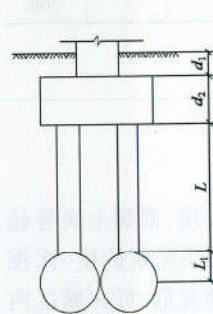


图 2 等效基础
计算示意图

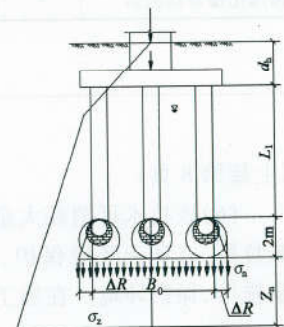


图 3 复合载体夯扩桩
沉降计算简图

对独立承台下布桩的基础:

$$p_0 = \frac{F + G - \gamma d_h A}{(L_0 + 2\Delta R)(B_0 + 2\Delta R)} \quad (6)$$

对墙下布桩条形承台梁基础:

$$p_0 = \frac{F + G - \gamma d_h A}{L_0 (B_0 + 2\Delta R)} \quad (7)$$

式中 ΔR 为等效计算距离(m),根据地质情况而定,一般为 0.6~1.0m。

2. 软弱下卧层的验算

当持力层下存在软弱下卧层时应进行下卧层承载力验算,计算公式为:

$$\sigma_z + \gamma_i z \leq q_{uk}^w / \gamma_q \quad (8)$$

式中: q_{sk}^w 为软弱下卧层经深度修正后的地基承载力特征值; γ_i 为软弱下卧层顶面以上各土层重度的加权平均值; γ_q 为地基承载力分项系数; σ_z 为软弱层顶面的附加应力, 根据复合载体夯扩桩的受力, 其计算为:

$$\sigma_z = \frac{\gamma_0(F + G) - 2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{(L_0 + 2\Delta R + 2t \tan \theta)(B_0 + 2\Delta R + 2t \tan \theta)} \quad (9)$$

式中 θ 为桩端硬土层的压力扩散角, L_0, B_0 为桩外边缘矩形面积边长, t 为载体底距软弱层顶面距离。

六、工程实例

某住宅楼工程位于滁州市开发区, 六层半, 砖混结构。其地质情况如表 2。基础为条形基础, 采用复合载体夯扩桩, 桩身混凝土强度等级为 C30, 桩径为 500mm, 桩长 6.0m, 设计单桩承载力特征值为 1 500kN。

地基土的物理力学指标 表 2

土层	容重 (kN/m ³)	含水量 (%)	孔隙比	压缩模量 (MPa)	承载力 (kPa)
淤泥质粉土	-	-	-	-	-
粉质粘土	19.4	27.1	0.783	6.5	145
粘土	25.3	19.6	0.746	7.6	240
含砾粉质粘土	25.8	19.7	0.744	6.9	240
强风化粉砂质泥岩	-	-	-	-	300

(上接第 8 页)

(6) 该技术可消耗大量的建筑砖块、混凝土块等建筑垃圾, 有利于环境保护, 施工中无须泥浆护壁、无泥浆排出, 保护环境。在施工过程中噪音低, 可在城区内施工。

(7) 该桩型适用范围广, 只要在一定深度下存在软塑~可塑状态的粘性土层、粉土层、砂土层、碎石土层等, 都可以进行复合载体扩展基础的施工, 尤其在浅部具有高承载力的低压缩性土、表层有较厚杂填土的场地、液化和湿陷性黄土地区, 该技术优势更为明显。

(8) 复合载体夯扩桩技术的关键工序是通过填料和夯击来实现设计要求的载体基础。

自复合载体夯扩桩发明以来, 得到广泛的应用, 为建设方节省了大量成本。采用复合载体夯扩桩, 由于改变了原来的基础形式, 避免了开挖, 改变了承台尺寸, 整体降低了工程造价。表 2 为几个典型采用复合载体夯扩桩工程的经济对比, 与传统地基处理方案进行对比, 复合载体夯扩桩在工程建设中有显著的经济效益。

根据规范, 载体底地基土承载力经深度修正后为 630kPa, 复合载体夯扩桩承载力 $R_a = 1 575kN$, 大于 1 500kN, 满足设计要求。

对复合载体进行沉降计算, 基础最终沉降为 18.4mm。

复合载体夯扩桩纵筋采用 8 Φ 14, 箍筋采用 Φ 6@200, 配筋率为 0.62%, 小于 0.65%。工程对单桩水平承载力没有提出要求, 经计算单桩水平承载力可达 98kN。

六、结语

着重对复合载体夯扩桩的设计中应注意的问题进行了介绍, 并提出了一些设计经验。但复合载体夯扩桩毕竟为一种新施工工艺, 岩土工程具有很强的地域特点, 故设计者必须结合当地的地质条件, 因地制宜, 才能更好地运用该技术。

参 考 文 献

1. 复合载体夯扩桩设计规程(JGJ/T135—2001). 中国建筑工业出版社, 2001.
2. 建筑桩基技术规范(JGJ94—94). 中国建筑工业出版社, 1995.
3. 建筑地基基础设计规范(GB50007—2002). 中国建筑工业出版社, 2002.
4. 刘金砺. 桩基础设计与计算. 中国建筑工业出版社, 1990.

地基处理方案经济性对比 表 2

工程名称	基础形式	上部结构	原设计方案	±0.00 以下造价(元/m ²)		节省造价 (%)
				原方案	现方案	
北京某宿舍楼	筏板基础	剪力墙	CFG 桩	46.3	37.0	20.1
北京儒林苑	独立承台	框架结构	混凝土灌注桩	122.5	88.0	27.2
光讯花园	条形基础	砖混结构	碎石桩	62.5	47.3	28.6

五、结语

复合载体夯扩桩作为一种新型的地基处理工艺, 施工工艺简单、高效快捷。已在全国 80 多个城市运用, 均取得了良好的效果, 具有显著社会效益和经济效益。

参 考 文 献

1. 顾晓鲁, 钱鸿晋, 刘惠珊等. 地基与基础. 中国建筑工业出版社, 2002.
2. 刘金砺. 桩基础设计与计算. 中国建筑工业出版社, 1990.
3. 复合载体夯扩桩设计规程(JGJ/T135—2001). 中国建筑工业出版社, 1991.