

嵌岩抗拔桩承载力评估及其抗浮的优化设计

姚梅红

(福建船政交通职业学院 道路工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 结合工程实践,以高层建筑附建式纯地下室与主体间的沉降差控制为目标,论述嵌岩扩底灌注桩抗拔承载力的合理估算、纯地下室采用桩基应对整体抗浮不足的优化设计方法。工程实践证明,嵌岩扩底桩可显著提高单桩的抗拔承载力,其嵌岩段抗拔极限侧阻力的估算可参照承压嵌岩桩的方法,以岩石单轴饱和抗压强度标准值表达桩的极限侧阻力标准值,并乘以抗拔折减系数来取值。

关键词: 抗拔灌注桩; 扩底端; 预应力; 裂缝控制

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)03-0218-05

The evaluation of bearing capacity and the optimization design of anti-floating capacity for forrock-socketed anti-uplift piles

Yao Meihong

(Road Engineering Department, Fujian Chuangzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Targeted at a scientific control of differential settlement between the attached pure basement of high-rise buildings and the main body in engineering projects, the reasonable estimation of the anti-uplift capacity of rock embedded under-reamed cast-in-situ piles and the optimization design schemes for pure basement to improve the overall anti-floating capacity were discussed. The engineering practical results indicate that the rock embedded under-reamed cast-in-situ piles can increase significantly the uplift bearing capacity of single piles. The estimation of ultimate side uplift resistance of the cast-in-situ piles' embedded part can refer to the method used in rock-embedded pressure bearing piles. The ultimate side resistance standard value of the piles can be expressed by rock uniaxial saturated anti-compressive strength standard value multiplied by the uplift reduction factor.

Keywords: uplift cast-in-situ pile; under-reamed pile bottom; prestress; cracking control

由于城市建设的不断发展,空间开发力度与日俱增,各种类型的地下广场、地下商场、人防工程、地下车库等越来越多,基础埋深也越来越深。特别是高层建筑的附建式地下室,常见几栋甚至十多栋塔楼共用一大地下室的情形,其纯地下室范围远大于上部建筑,而且高层塔楼与纯地下室间往往不设缝,此时,纯地下室部分因没有上部结构、自重较轻的缘故,不仅抗浮问题突出,而且与

高层间的沉降差控制也是非常棘手的难题。尤其在沿海地区,地下水位浅,持力层埋深大,抗浮与沉降差控制几乎形成一对矛盾,因为纯地下室部分若因抗浮不满足要求而设置抗拔桩,设计不当其沉降将受到限制,反而加大了两者的沉降差。

本文以某实际工程为例,从现有规范中尚未明确的嵌岩抗拔桩的承载力该如何合理评估入手,探讨高层建筑附建式地下室抗浮的优化设计。

1 工程概况

某地一栋高层办公楼,上部建筑主楼为 26 层框剪结构,总高度 98.4 m;裙楼为 4 层商场、框架结构,高度 19.6 m。 ± 0.00 标高相当于绝对标高(黄海高程)9.600 m。地面以下设 2 层、局部 3 层地下室,主要作为人防单元、设备用房及机动车停车库使用,其中地下二层为“三层有底坑升降横移式”立体停车库;地下室底板面的相对标高统一为-11.400 m,相当于黄海高程-1.80 m。其总平面如图 1 所示。

地下室外周尺寸为 65.1m×91.0 m,平面面积 5 924.1 m²;上部结构典型柱网尺寸为 8.4 m×8.1 m,

含裙楼在内建筑外轮廓尺寸 42.2 m×51.8 m,总占地面积 2 125.52 m²,不足地下室平面面积的 36%,且主楼、裙楼、纯地下室连为整体,三者间均未设缝。

建筑场地属山前缓坡与平原过度地貌,各土层分布及其物理特性详见表 1。勘察期间实测钻孔水位黄海高程在 7.82~8.18 m 左右,属潜水,主要赋存于顶端饱和粘性土中,水量较小,水位变幅 1.00 m 左右;下部③号层圆砾为主要承压含水层,根据区域资料其承压水水头黄海高程在 0.00 左右,水量较丰;底部基岩无明显裂隙水发育。建议地下室抗浮水位取黄海高程 8.00 m。

2 地下室抗浮设计

由于地下室埋深大,底板面处于第①、②层粉质黏土层交界面上,抗浮水位高,且近 2/3 的地下室上部没有建筑压重来平衡水浮力,因此纯地下室部分的整体抗浮设计成为基础设计的关键。

2.1 桩型选择

根据场地土层分布及建筑竖向设计(见图 2),地下室底板面距第④-2 中风化泥质粉砂岩层仅 10.0 m 左右,虽然地勘报告提供的抗浮水头在底板面上 9.8 m 左右,但该水位是根据区域资料得来的而非实测水位,况且勘探时恰好是丰水期,而基础施工却是枯水期,另外,该场地位于新开发区,业主为当地的老牌施工企业,事先了解过其紧

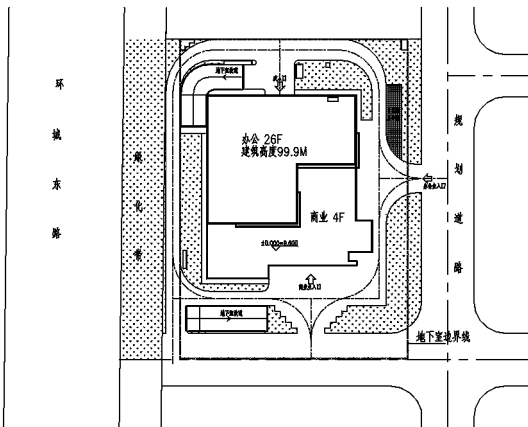


图 1 总平面图

Fig.1 General layout of a basement in a certain high-rise building

表 1 各土层分布及其物理特性

Tab.1 Distribution and physical property of soil layers

| 岩土类型 | 承载力 特征值 f_{ak}/kPa | 天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 土层厚度/ m | 层面绝对 标高/m | 土层特性 | 桩极限侧 阻力标准值 q_{sik}/kPa | 桩极限端 阻力标准值 q_{pk}/kPa |
|------------------|-----------------------------------|--|------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| ①粉质黏土 | 150 | 18.67 | 9.50~10.80 | 8.25~ 8.33 | 硬可塑局部软可塑 饱和,均匀性较差 | 22.0 | |
| ②粉质黏土 | 140 | 19.61 | 1.50~3.50 | -2.16~-1.18 | 硬可塑~硬塑 饱和,较均匀 | 28.0 | |
| ③圆砾 | 200 | | 5.10~6.80 | -5.91~-4.00 | $N_{63.5}=8.9$ 击,稍密 粉黏粒含量 11%~18% | 50.0 | |
| ④-1 强风化 泥质粉砂岩 | 400 | | 0.60~2.00 | -11.38~-10.00 | $N_{63.5}=16.4$ 击 | 80.0 | |
| ④-2 中风化 泥质粉砂岩 | 4 300 | | 未揭穿>5.0 m | -12.68~-11.11 | 单轴饱和抗压强度 标准值为 14.6MPa | 140.0 | 7 600 |

邻周边丰水期内先行开工的工程在基础(也有采用人工挖孔灌注桩的)施工过程中的情况,发现即使是第③圆砾层也没有太大的地下水,采用井点降水措施就可以解决,因此,业主建议基础使用人工挖孔灌注桩,若不考虑第③圆砾层的地下水问题,人工挖孔灌注桩是最适宜的基础型式。该桩型属非挤土扩底灌注桩,施工全过程质量直观、可控且无振动、噪音的不利影响,桩端可按抗压或抗拔承载的需要来扩底,不仅单桩竖向抗压承载力高,而且由于桩扩底端在持力层里的嵌固作用,相比其他桩型,单方混凝土的竖向抗拔承载力得到极大提高。

对于地层分布,抗浮也可采用锚杆。单根 $\phi 150\text{ mm}$ 普通锚杆的抗拔承载力特征值最大在 250 kN 左右,造价却高达 170 元/m 左右;若桩身直径 0.90 m 、扩底端直径 1.50 m 的人工挖孔灌注桩,其抗拔承载力特征值能达 $1\,500\text{ kN}$,造价则只要 $750\sim 800\text{ 元/m}$ 左右;所需桩长与锚杆相差无几,因此使用抗拔桩要比锚杆节省约 $1/4$ 的造价。况且,由于锚杆直径小,现场施工质量不易保证,难以 100% 达到设计要求。

基此,本工程底板采用钢筋混凝土梁板体系,板厚 500 mm ,基础采用 C30 混凝土强度等级的人工挖孔灌注桩,地下室结构、灌注桩及其与土层的相对关系如图 2 所示。

2.2 嵌岩抗拔桩承载力估算及设计

由于抗浮设计水位较高,作用在底板底面的垂直向上的水浮力标准值为 $(9.8+0.5)\times 10=103\text{ kN/m}^2$,而机动车停车库部分两层地下室结构及覆土自重(不含活载)标准值仅 46.5 kN/m^2 ,因此要满足抗拔要求,底板需提供的抗拔力标准值要大于 $103\times 1.05-45=63.15\text{ kN/m}^2$,每个典型柱网需提供的抗拔力标准值要大于 $8.4\times 8.1\times 63.15\approx 4\,300\text{ kN}$,这个作用与纯地下室结构部分每个柱下的荷载(不含底板及其覆土自重)相近。从竖向承压的角度考虑,纯地下室部分每个柱下布置一根扩底直径 1.2 m 、桩身直径 0.9 m 的桩(单桩竖向抗压承载力特征值 $5\,100\text{ kN}$)就已足够了;但从抗拔角度考虑,由于灌注桩单桩竖向抗拔承载力相对于竖向抗压承载力小得多,拟在每个柱下设置 3 根抗拔桩,如此每根抗拔桩的竖向抗拔承载力特征值要达到 $1\,450\text{ kN}$ 。

通常以圆柱面剪切法来估算单桩竖向抗拔承

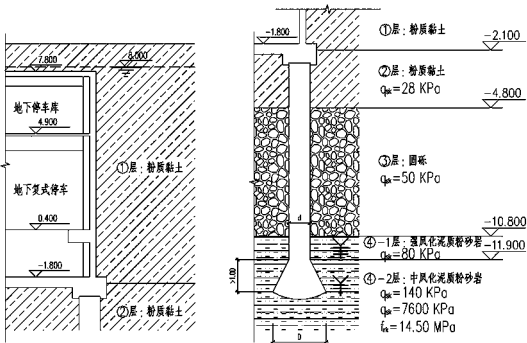


图 2 地下室结构、灌注桩及与土层的相对关系
Fig.2 Basement structure, cast-in-situ pile and their relationship with soil layer

载力特征值^[1],其计算模型如图 3,计算公式如下:

T_a = T_{uk}/2 + G_p (1)

T_{uk} = U_{s1} ∑ λ_i q_{sik} l_{i1} + U_{s2} ∑ λ_i q_{sik} l_{i2} (2)

式中, T_a 为基桩抗拔承载力特征值; T_{uk} 为基桩抗拔极限承载力标准值; U_{s1} 为 l_1 段桩身截面计算周长, $U_{s1} = \pi d$; U_{s2} 为 l_2 段桩身截面计算周长, $U_{s2} = \pi D$; l_{i1} 为扩底端压剪区段以上 l_1 段内各土层的厚度; l_{i2} 为扩底端压剪区段即 l_2 段内各土层的厚度; q_{sik} 为桩侧表面第 i 层土的抗压极限侧阻力标准值; λ_i 为抗拔系数,砂土取 $0.60\sim 0.70$,黏性土、粉土取 $0.70\sim 0.80$; 桩长径比 $l/d < 20$ 时,取小值; G_p 为桩自重,地下水位以下取浮容重,对于扩底桩分段取值,原则同 U_{si} 。

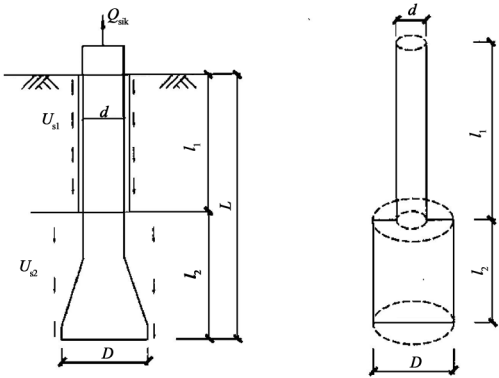


图 3 抗拔扩底灌注桩承载力计算模型
Fig.3 Calculation model of the bearing capacity of uplift under-reamed cast-in-situ pile

扩底端压剪区段长度随土的内摩擦角大小而变,内摩擦角愈大,扩底端压剪区段长度愈长。国

标《建筑桩基技术规范》^[2] JGJ94—2008 建议软土取 4 d 左右,卵、砾石取 7~10 d;而上海市《地基基础设计规范》^① DGJ08-11—2010 根据上海地区土层以黏性土和粉性土为主的特点,建议扩底端压剪区段长度取扩大头高度以上 8D 范围,但不计桩在软弱土层中的长度。笔者认为上海市的取值更合理,因为①国标扩底端压剪区长度按桩身直径而不是扩底端直径来表达,对不同扩底端直径而同桩径的桩,会得到扩底端压剪区长度相同的结果,这从直观的角度看不尽合理;②扩底端压剪区段长度的取值,对以黏性土和粉性土为主的上海地区能取扩大头高度以上 8D,对土性更好的卵、砾石层,应该更大才合理;③上海的结论是建立在更多的试桩资料之上。

本工程抗拔桩拟选用桩身直径 $d = 0.90$ m、扩底端直径 $D = 1.50$ m 的人工挖孔灌注桩,桩端全截面进入持力层深度不小于 $1.0D$,桩与土层的相对关系见图 2。这种桩型的单桩抗拔承载力特征值上述两规范都没明确该如何计算,若参照 JGJ94—2008 计算结果为 1 297.5 kN,而参照 DGJ08-11—2010 计算结果为 1 349.4 kN,计算中扩底端压剪区段长度及抗拔系数(风化岩取 0.8,圆砾取 0.7)均取高值。由于扩底端持力层为较完整的中风化泥质粉砂岩,其单轴饱和抗压强度标准值 f_{rk} 达 14.50 MPa,对嵌入其中的桩扩底端的约束要比任何土层强得多,因此可判定基桩抗拔极限承载力标准值按公式(2)计算的结果偏于保守。

对于嵌岩抗拔桩,笔者认为图 3 所示的圆柱面剪切法的计算模型仍然适用,但其抗拔极限承载力标准值的估算应参照嵌岩桩单桩竖向抗压承载力的模式,将桩侧阻力分为土层及嵌岩段两部分,按下式计算:

$$T_{uk} = T_{sk} + T_{rk} \quad (3)$$

$$T_{rk} = \lambda_r \zeta_s f_{rk} U_{sl} l_r \quad (4)$$

式中, T_{sk} 为土总极限侧阻力标准值,按公式(2)计算; T_{rk} 为桩嵌岩段总极限侧阻力标准值; λ_r 为嵌岩段抗拔系数,取 0.70; ζ_s 为桩嵌岩段侧阻系数,按 JGJ94—2008 第 5.3.9 条条文说明表 9 取值; f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值; l_r 为嵌岩段长度。

公式(4)是在承压桩嵌岩段基于 f_{rk} 计的极限侧阻力标准值的基础上,乘以抗拔折减系数取值,与公式(2)一脉相承,简单实用。且其结果与文献[3]锚桩相近。

若按公式(3)、(4)计算,且扩底端压剪区长度按 DGJ08-11—2010 取值,上述桩单桩抗拔承载力特征值为 2 962.4 kN,单嵌岩段就达 2 008.9 kN,比公式(1)、(2)的计算结果大了不止一倍。按嵌岩计算模式, $\phi 900$ mm 等直径桩即可满足抗拔承载力不低于 1 450 kN 要求,考虑到人工挖孔桩扩底不难,且扩底端需增加的混凝土量有限,从工程安全、实用的角度并兼顾承压的需要,本工程设计扩底端直径采用 1.50 m。

虽然嵌岩扩底桩的地基承载力很高,但仍受桩身抗拔承载力的限制。由于钢筋混凝土基桩位于地下水位之下,根据耐久性规定,环境类别为二(a)类,裂缝控制等级为三级,最大裂缝宽度限值为 0.2 mm。同时由于地勘建议的抗浮水位接近常年水位,基桩上拔力准永久组合值与标准组合值相差无几,根据《钢筋混凝土设计规范》^[4] GB50010—2010 第 7.1.2 条公式,当桩身纵筋配 32 ϕ 20 时,最大裂缝宽度刚好满足要求。

2.3 抗拔桩布置的优化

抗拔桩设计需要同时考虑两种极端荷载工况,一是地下水位达到抗浮的最高水位时,抗拔桩承受竖直向上水浮力与结构自重之差的荷载作用,并通过桩身与周围土体间的侧摩阻力将其传给土体;另一工况是地下水位降至基础底面以下,抗拔桩同其他基桩一道承受全部竖直向下的荷载,此时抗拔桩变成成为抗压桩。

本工程可采用中风化泥质粉砂岩作为人工挖孔桩的持力层,上部高层部分除筒芯及角部剪力墙采用群桩外,框架柱均可采用单柱单桩。扩底尺寸按上部荷载及地基承载力确定,最小直径 1.8 m,最大直径 3.0 m,桩端全截面进入持力层不小于 1.0 m;桩身尺寸按混凝土承载力控制,最小直径 1.3 m,最大直径 2.1 m;单桩竖向抗压承载力特征值 10 400~27 300 kN。

基于上文 2.2 的估算,纯地下室部分每个柱下承压仅需要 1 根桩,而抗拔却需要 3 根桩,常规的做法是将 3 根抗拔桩全数集中布置在每个柱

① 上海市城乡建设和交通委员会:《DGJ08-11-2010 地基基础设计规范》,2010。

下,优点是传力直接、受力明确。可由于抗拔桩的支承作用,每根桩承担的荷载明显小于主楼下的桩,造成主楼与纯地下室间产生较大的基础沉降差。特别是主楼与裙房、纯地下室之间高度及荷重相差悬殊,建筑又不允许设缝,若如此布置抗拔桩,将对结构产生非常不利的影响。

从平衡主楼、裙房、纯地下室之间相对沉降的角度考虑,需要控制各部分基础在承压时的应力水平尽可能地接近,因此本工程基础设计时,底板采用整体刚度较大的梁板体系,纯地下室部分柱下仍采用单柱单桩,所需的另外两根抗拔桩分散布置到柱间的基础连系梁跨中处。如此布置抗拔桩的另一个好处是:因跨中抗拔桩的存在,可大幅度降低基础连系梁的受力情况及应力水平,节省其用钢量。

2.4 抗拔试验、沉降观测结果及其评价

桩基完成后,在基坑范围内随机抽取 3 根抗拔基桩,按《建筑地基基础设计规范》GB50007—2011 附录 Q 的相关要求进行单桩抗拔试验。试验加荷方式为慢速维持荷载法,每级荷载增量均为 300 kN,最大试验荷载均加至 3 000 kN。其单桩竖向抗拔静载试验 $U-\Delta$ 曲线如图 4。

试验桩在最大荷载作用下桩顶上拔量均较小,分别为 13.64、14.66 和 15.53 mm,且没有明显位移增大的现象,对应的残余变形分别为 8.97、6.27 和 7.57 mm,而在设计荷载下对应的变形分别为 4.26、3.97 和 5.12 mm。由此可见,在设计荷载作用下,桩端抗力几乎没有发挥的机会,荷载基本由桩侧阻力来抵抗;而在最大荷载作用下,桩端抗力仅有部分发挥。虽然试桩未达极限承载状态,但其结果验证了 2.2 节嵌岩扩底桩承载力评估方法的合理性。

施工过程中,特别安排具有专业测量资质的第 3 方对上部建筑及地下室进行全程沉降观测,从地下室完工到整个建筑装修完成历经两年,上

部结构最大沉降发生在筒芯处,累计 9.62 mm,最小沉降发生在裙楼西南角,累计 6.37 mm;地下室最大沉降发生在东北角,累计 3.43 mm;最小沉降发生在东南角,累计 1.82 mm。从最终沉降观测结果看,所有观测点的沉降都很小,沉降差更小,桩基完成至今已 3 a,建筑没有出现任何异常现象,这表明主体与地下室间的沉降差控制完全达到设计预期的目标。

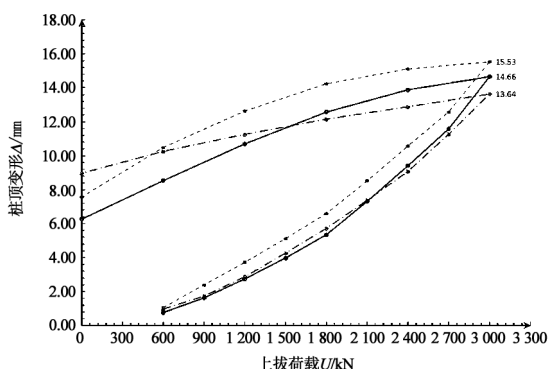


图 4 单桩竖向抗拔静载试验 $U-\Delta$ 曲线

Fig. 4 The $U-\Delta$ curve with the result of the uplift capacity test on single pile

3 结论

1) 与普通桩相比,嵌岩扩底桩可显著提高单桩的抗拔承载力,其嵌岩段抗拔极限侧阻力的估算可参照嵌岩承压桩的计算方法,在基于 f_{tk} 的极限侧阻力标准值基础上乘以抗拔折减系数取值。

2) 当高层与裙房、纯地下室之间未设缝时,高层的沉降相对较大,而裙房、纯地下室沉降很小,如果因抗浮不满足要求而在裙房、纯地下室范围设置抗拔桩,其底板应采用整体刚度较大的梁板体系,并将抗拔桩尽可能分散地布置在结构柱下。避免由于抗拔桩的支承作用,让裙房、纯地下室的沉降受到限制,加大了高层与裙房、纯地下室间的沉降差。

参考文献:

- [1] 刘金砺,高文生,邱明兵. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:120—124.
- [2] 史佩栋. 桩基工程手册:桩和桩基础手册[M].北京:人民交通出版社,2008:169—174;
- [3] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范:JGJ94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋混凝土设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.