

左手抗浮 右手减沉—— 抗浮车库中桩基抗拔与抗压的实践研究

王欲秋¹ 杜 鹏^{2,*}

(1. 济南市规划设计研究院, 济南 250101; 2. 同圆设计集团股份有限公司, 济南 250101)

摘 要 地下车库采用桩基抗浮时,其受压工况的计算一直不太明确。结合工程实例,分别在单层和两层抗浮车库中,采用柱墩筏板+抗拔桩(减沉桩)的基础形式,桩基数量以抗浮工况确定,受压工况下采用减沉疏桩复合桩基的设计方式,实现以最少的桩基数量满足抗浮又能合理发挥天然土层承载力的目的,达到安全、经济、受力合理的目的。该方法是一种较为简化的设计方法,但其理论依据清晰,安全度可以满足要求。

关键词 抗浮, 抗压, 减沉疏桩基础, 复合桩基, 筏板基础

Left Hand Anti-floating, Right Hand Sinking——Anti-floating and Compressive Resistance of Pile Foundation in Garage Foundation

WANG Yuqiu¹ DU Peng^{2,*}

(1. Jinan City Planning and Design Institute, Jinan 250101, China;

2. Shandong Tongyuan Design Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract Combined with engineering examples, in the case of a single-storey garage and a two-storey garage respectively, the foundation form of raft and column pier and anti-uplift pile (reduced settlement pile) is adopted, and the number of anti-uplift piles is calculated according to the anti-floating requirements; under-column compensation piles, four piles under the column are used in this project to balance the settlement in two directions; the method of inverted beam and girder floor is used to verify the high water level anti-floating requirements of the foundation; the composite foundation method is used to verify that the water level is below the foundation; strive to achieve reasonable calculations for both anti-floating and compressive working conditions. This method is a relatively simplified algorithm, but it relies on the refinement of parameters such as soil coefficient of subgrade reaction, pile stiffness coefficient, and cap effect coefficient.

Keywords composite foundation, anti-floating, compressive, simplified algorithm, raft foundation

0 引 言

《建筑工程抗浮设计标准》(JGJ 476—2019)^[1]自2020年3月1日开始实施。对于抗浮等级为甲级的工程,新标准将抗浮稳定系数提高至1.1,结构上部

和内部填筑体的抗浮力组合系数确定为0.9,对配重抗浮的经济性相对而言有更大的影响;由于裂缝控制的要求,普通锚杆的使用范围也大大受限。这些都会导致桩基抗浮应用的增加。

对于位于软土地基上、与高层塔楼相连的单层或多层地库,当采用桩基抗浮时,考虑地下水位的起

收稿日期: 2021-09-09

作者简介: 王欲秋,硕士,高级工程师,一级注册结构工程师。E-mail: 304358076@qq.com

* 联系作者: 杜 鹏,硕士,工程技术研究员,一级注册结构工程师。E-mail: 2870279215@qq.com

伏及降水,惯常的做法是抗浮工况及抗压工况全部由桩承担。该做法会导致以下问题:此种结构基底平均压力不大,天然地基承载力通常可以满足或略有欠缺;柱下反力与房心反力不均匀,柱下超过地基承载力的可能性大;筏板配筋不均匀;抗压工况所需桩数多于抗拔工况,造成桩基的浪费。如果桩基仅用于抗浮,而抗压时不考虑,则在低水头时基础的受力和变形都会存在较大偏差。

针对该类项目,本文提出了按照高水头抗浮要求确定所需桩基,而在水头位于基底以下时考虑桩土共同承担上部荷载,按照“减沉疏桩+筏板基础”的设计办法,则可以实现既能以最少的桩基数量满足抗浮又能合理发挥天然土层承载力的目的,而且能够降低筏板配筋峰值,达到安全、经济、受力合理的平衡。

1 基本原理

1.1 桩的抗拔与减沉机理

采用桩基抗浮时,一般会将桩集中布置于柱下的承台或柱墩之下,使桩承载力形心与上部荷载作用点重合,而在承台或柱墩间设置厚度较大的抗水板或筏板。这样可以充分利用上部结构传下的自重及压重荷载,桩基的抗拔承载力只需补足水浮力与上部压重的差值即可(当然需满足相应的抗浮稳定系数)。

在最高水头的抗浮工况时,桩与结构柱共同构成了不动支座,力的传递途径为:基础底面水浮力→筏板(抗水板)→柱墩(承台)→桩。为了减小柱墩间筏板的计算跨度,可以尽量增大桩间距,加大柱墩尺寸,扩大支座范围。而桩基选型是根据抗浮需要,对桩端持力层要求不高。

在软土地基上,摩擦桩的集中布置和桩距的增大,恰恰成为了受压工况下减沉疏桩发挥作用的有

利条件。将基础按筏板设计,在受压工况下,成为了整片筏板和柱下局部基桩共同发挥作用的特殊减沉疏桩-筏板基础。

柱下布桩增大了局部地基刚度,相当于对应上部荷载最大处在土体中植入了大刚度的弹簧,可以减小柱位处基础的沉降,从而使整片筏板的变形更加趋于均匀。当采用桩长不太大的摩擦桩(弹簧刚度有限)时,柱墩下可以实现桩土的共同变形、共同承担荷载,柱墩范围外土体的变形更是小于桩的变形。

有赖于筏板的刚度,可以实现土体承担大部分竖向荷载,桩承担小部分荷载,从而实现在天然地基承载力欠缺不大时,用抗浮所需基桩配合筏板基础即可满足竖向承载的安全度。

由于实现了柱下减沉,筏板配筋也会相应减小,进一步提高经济性。竖向荷载下减沉桩计算的关键是解决桩土承载的分配,即弹簧刚度匹配的问题。

1.2 减沉复合疏桩基础的定义

当软土地基上多层建筑地基承载力基本满足要求时,可设置穿过软土层进入相对较好土层的疏布摩擦型桩(4~6倍桩径),由桩和桩间土共同分担荷载^[2]。设计时,在满足总体安全度 $K \geq 2$ 和总沉降小于容许沉降的双重控制条件下,按单桩极限承载力设计^[3]。该种减沉复合疏桩基础,可按下列公式确定承台面积和桩数^[4]。

$$A_c = \zeta \frac{F_k + G_k}{f_{ak}} \quad (1)$$

$$n \geq \frac{F_k + G_k - \eta_c f_{ak} A_c}{R_a} \quad (2)$$

式中: A_c 为桩基承台总净面积; f_{ak} 为承台底地基承载力特征值; ζ 为承台面积控制系数, $\zeta \geq 0.60$; F_k 为相应于作用的标准组合时,上部结构传至基础顶面的竖向立值; G_k 为基础自重和基础上的土重; R_a 为单桩竖向承载力特征值; n 为基桩数; η_c 为桩基承台效应系数,可按表1取值。

表1 承台效应系数 η_c
Table 1 Pile cap effect coefficient

S_a/d B_c/l	3	4	5	6	>6
≤ 0.4	0.06~0.08	0.14~0.17	0.22~0.26	0.32~0.38	0.50~0.80
0.4~0.8	0.08~0.10	0.17~0.20	0.26~0.30	0.38~0.44	
>0.8	0.10~0.12	0.20~0.22	0.30~0.34	0.44~0.50	
单排桩条形承台	0.15~0.18	0.25~0.30	0.38~0.45	0.50~0.60	

注:①表中 S_a/d 为桩中心距桩径之比; B_c/l 为承台宽度与桩长之比。当计算基桩为非正方形排列时, $S_a = \sqrt{A/n}$, A 为承台计算域面积, n 为总桩数。②对于桩布置于墙下的箱、筏承台, η_c 可按单排桩条形承台取值。③对于单排桩条形承台,当承台宽度小于1.5 d 时, η_c 按非条形承台取值。④对于采用后注浆灌注桩的承台, η_c 宜取低值。⑤对于饱和黏性土中的挤土桩基,软土地基上的桩基承台, η_c 宜取低值的0.8倍。

当承台底为液化土、湿陷性土、高灵敏度软土、嵌固结土、新填土时,沉桩引起超孔隙水压力和土体隆起时,不考虑承台效应,取 $\eta_c=0^{[4]}$ 。

2 适用条件和注意事项

(1) 抗浮方案适合采用桩基。

(2) 天然地基的承载力基本可满足上部结构受压承载力,或略有不足;基底土层不得为可液化土、湿陷性土、高灵敏度软土、欠固结土等。

(3) 采用筏板基础,以较为充分地发挥土层承载力。综合考虑抗压和抗浮,采用下柱墩筏板更为经济合理。

(4) 采用摩擦桩或端承摩擦桩,桩端可进入相对较好的土层中,但不能位于岩石或坚硬土层中;控制桩长不要过长。考虑抗拔桩的抗裂控制引起的钢筋增大,采用预应力预制桩可获得更好的效果。

(5) 桩集中布置于柱(墩)下,桩间距拉大,以4~6倍桩径为宜,一方面可以在抗浮工况时减小计算板跨,另一方面也可以在抗压工况时增大承台底土的发挥效应。

3 实现方法

根据柱网布置、荷载条件、基底土层的性状,综合考虑抗浮要求初选筏板厚度。

根据抗浮设防水位、上部结构的自重及压重,按照《建筑工程抗浮设计标准》所规定的抗浮稳定安全系数,计算确定抗浮桩的选型。布置抗浮桩,使桩距控制在4~6倍桩径,初步确定柱墩尺寸及厚度。

不考虑活荷载及装修荷载,在最高水头下进行模型抗浮计算,验证抗浮桩的承载力是否满足,筏板和柱墩的厚度是否合适。抗浮计算时计算方法应选择“倒楼盖法”。

低水头或水位低于基底时的受压验算:

1) 土的基床系数和桩刚度系数的确定

文克尔地基上任何一点所受的压力强度 $P(x)$ 与该点的沉降量 S 成正比,该系数定义为基床系数 K 。

$$K=P/S \quad (3)$$

通过该定义,可以通过地基平板载荷试验绘制 $P-S$ 曲线,取该曲线的直线段可计算地基的基床系数。

YJK和PKPM均提供了两种确定基床系数的方法:根据地质资料自动计算和人工指定。根据地质

资料自动计算的方法是先进行分层总和法的沉降计算,再根据压力反推基床系数。此方法看似严谨,但最终沉降量的计算是基于土的排水-固结理论,与基于土体强度破坏理论的平板载荷试验并无关联,脱离了刚度系数的定义理论。因此,推荐采用人工指定法,可根据工程地质经验在程序推荐数据范围内选取,有条件时通过平板载荷试验确定。

桩刚度系数在程序说明书中也比较明确:桩基竖向刚度=桩承载力特征值(kN)/对应的桩顶沉降(m),可根据试桩报告中的 $Q-S$ 曲线在相应点的斜率求得,即

$$K_p=R_d/S \quad (4)$$

式中: R_d 为单桩承载力特征值; S 为对应的桩顶沉降。

2) 承台效应系数和柱墩范围土基床系数的调整

在《桩基规范》的5.6.1条减沉疏桩基础计算和5.2.5条复合基桩计算时,均提到了承台效应系数 η_c ,也可理解为承台底土承载力发挥的折减系数^[4]。这是由于桩沉降时通过桩侧剪力引起的桩周土竖向变形引起的。由于筏板基础仅在柱墩下局部布桩,需要在柱墩及其周边一定范围内对土的基床系数进行调整,使柱墩底土的反力不超过 $\eta_c f_{ak}$ 。根据桩间距及桩长的不同, η_c 取值范围可在0.2~0.4。

3) 程序实现

计算方法应选择“弹性地基梁板法”;计算分析时考虑上部结构刚度;基础类型应选择“复合桩基”,按照前述方法确定土层基床系数和桩的刚度系数。

根据布桩情况按照表1确定承台效应系数 η_c ,通过调整桩土之间的刚度关系、布桩间距以及柱墩与周边范围的承台效应系数反复计算,最终需满足以下结果:桩竖向反力不超过 R_d ;柱墩及周边范围土层反力不超过 $\eta_c f_{ak}$,其余范围土层反力不超过 f_{ak} ;基础最终沉降满足要求。

采用通过调整的模型,按照抗浮工况和抗压工况包络配置筏板钢筋。

4 工程实例

4.1 工程一(单层车库)

本工程位于东营市,地下一层,车库层高4.0 m,车库顶板上设覆土,覆土厚度1.40~1.50 m。采用框架结构,柱距多数为8.4 m×8.4 m。自基底算起的车库抗浮水头约5.2 m。基础及抗浮设计等级均为甲级,抗浮安全系数需满足1.1。

本工程所在地区地表土层主要为第四系泛黄冲积物,主要为黏性土、粉土及粉细砂。基础持力层为粉质黏土,承载力特征值为 80 kPa。

方案一:天然地基筏板基础+配重抗浮。筏板厚度 400 mm,柱下设置上柱墩。经初步计算,抗浮设防水位时,车库自重及其顶板覆土重量无法满足整体抗浮,筏板上需要全部填筑 0.65 m 厚度的毛石混凝土,以达到 1.1 倍的抗浮稳定安全系数。低水位时,基底土的平均反力约为 69 kPa,柱墩下的最大反力约为 90 kPa,天然地基承载力基本满足要求。

方案二:采用桩基方案,独立承台+防水底板,防水底板厚度 400 mm。桩基选用预应力管桩,结构的抗压及抗拔荷载全部由桩基承担。桩基承载力由受压工况控制,每颗柱下需布置 4 根直径 500 mm、桩长 21 m 的预制管桩。

方案三:采用本文方法,基础采用筏板+下柱墩+抗拔桩(减沉桩),筏板厚度 400 mm,柱墩下集中布置预应力管桩。抗浮水位下管桩仅用于补足整体抗浮所需差值,低水位下由桩基与天然地基共同承担上部荷载。桩基承载力由整体抗浮与结构自重的差值控制,同样采用桩径 500 mm 的预应力管桩时,桩长可减为 12 m。桩基抗压承载力特征值为 900 kPa,抗拔承载力特征值为 450 kPa。基础布置如图 1 所示。

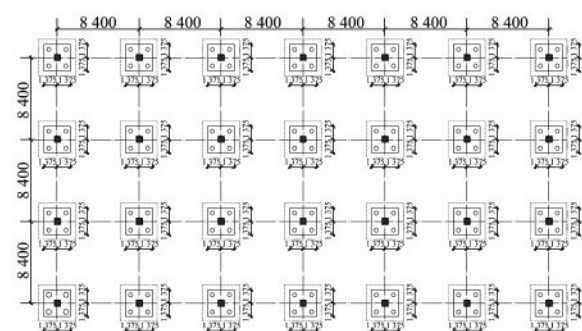


图1 基础布置图(工程局部示意)(单位:mm)

Fig.1 Foundation layout drawing
(partial schematic of the project) (Unit:mm)

采用倒楼盖法进行抗浮设防水位下基础整体抗浮的验算,验算结果表明:结构整体抗浮稳定系数满足 1.1,桩基抗拔承载力满足设计要求。

采用复合减沉疏桩基础方式,验算水位在基础以下(低水位)时的抗压工况。取桩间距为 $4.5d$,由桩中心距与桩径之比(S_d/d),及柱墩(承台)宽度与桩长之比(B_d/l),参照《建筑桩基技术规范》表 5.2.5,可取承台效应系数 $\eta_c=0.30\sim 0.35^{[4]}$ 。桩抗压刚度系数

K_p 取为 45 000,柱墩之间土的基床系数 K 取为 10 000,柱墩及其周边范围土的基床系数可参照承台效应系数在一定范围内折减,经计算调整后取为 2 500,采用 YJK 软件的“弹性地基梁板”法,考虑上部结构刚度进行基础计算。软件根据各部位刚度进行地基压缩计算和反力分配后,其计算结果满足:柱墩底土的反力不超过 $0.35f_{ak}$,柱跨间基底反力为 $(0.6\sim 0.7)f_{ak}$;桩承担 30%~35% 的总量荷载,同时单桩压力计算值在桩受压承载力特征值的 80% 左右。计算结果如图 2、图 3 所示。

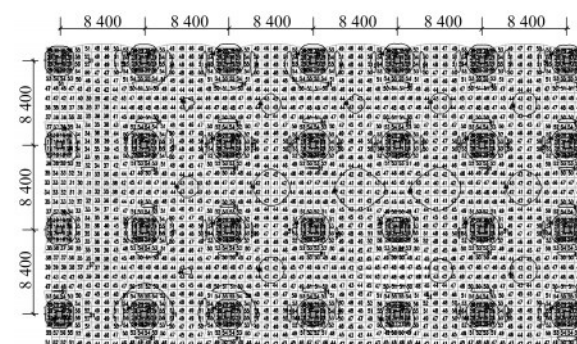


图2 基底压力图(工程局部示意)

Fig.2 Basement pressure diagram
(partial representation of the project)

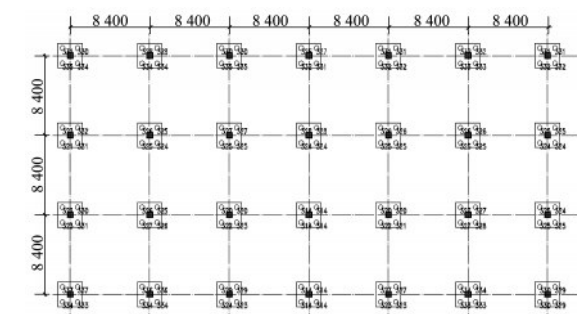


图3 桩竖向反力图(工程局部示意)

Fig.3 Pile vertical reaction force diagram (partial representation of the project)

基础沉降量及沉降差满足规范要求,且筏板的最大沉降差小于天然基础方案,筏板配筋峰值相应减少。

对三种方案的经济性进行比较,方案三的经济性优势明显,为最终实施方案。

此车库已于 2019 年竣工,至今经历了 2 个雨量较大的雨季,运行情况良好,验证了本文方法的合理性。

4.2 工程二(两层车库)

本工程位于济南市,地下两层,地下一层层高为

3.7 m, 地下二层层高为 3.6 m。车库地下二层地面绝对标高 18.50 m。车库顶板上设覆土, 覆土厚度 1.50 m 左右。本工程采用框架主梁大板结构, 柱距为 8.1 m×8.1 m。车库抗浮水位绝对标高 24.50 m。基础及抗浮设计等级为甲级。

本工程所在地区地貌单元属黄河-小清河冲积平原与山前冲洪积平原交处, 主要为黏性土。基础持力层为黏土, 承载力特征值为 90 kPa。

按照两种基础方案进行比较。

方案一: 天然地基+抗浮配重方案。采用筏板基础, 筏板厚度 500 mm, 如需满足整体抗浮稳定要求, 筏板上需要回填约 1.0 m 混凝土。在低水位工况下, 筏板基础平均反力约为 93 kPa, 柱下最大反力约为 125 kPa, 略超过天然地基承载力。

方案二: 采用抗拔桩, 基础形式为筏板+下柱墩+抗拔桩(减沉桩)。根据抗浮稳定要求确定抗拔桩数量, 8.1 m×8.1 m 柱网下, 每颗柱下布置 4 根直径 500 mm、桩长 14 m 的预制管桩。

在抗浮设防水位下, 采用倒楼盖法进行基础整体抗浮的验算, 验算结果表明: 结构整体抗浮稳定系数满足 1.1, 桩基抗拔承载力满足设计要求。

基础布置如图 4 所示。

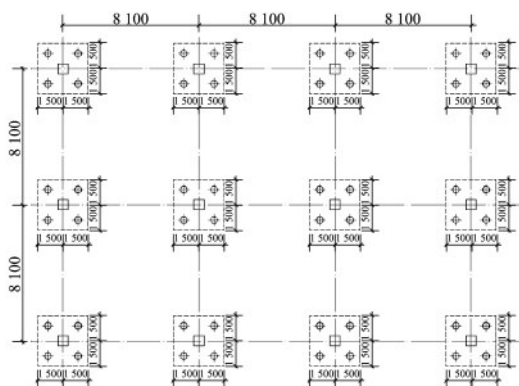


图4 基础布置图(工程局部示意)(单位:mm)

Fig.4 Foundation layout drawing
(partial representation of the project) (Unit:mm)

低水工况下, 采用减沉桩设计的办法, 考虑桩土共同作用, 确定桩间距为 $5d$, η_c 取为 0.35~0.40, 在符合基础抗浮的情况下, 满足工程受压工况设计要求。

桩抗压刚度系数 K_p 取为 50 000, 柱墩之间土的基床系数 K 取为 10 000, 柱墩及其周边范围土的基床系数参照承台效应系数, 经计算调整后取为 3 000, 采用 YJK 软件的“弹性地基梁板”法计算后, 本工程基本满足柱墩底土的反力不超过 $0.4f_{ak}^{[4]}$, 柱跨间满

足不超过 $(0.7\sim0.8)f_{ak}$; 桩压力承担 25%~30% 的荷载, 同时桩压力计算值在桩受压特征值的 80%~85%。计算结果如图 5、图 6 所示。

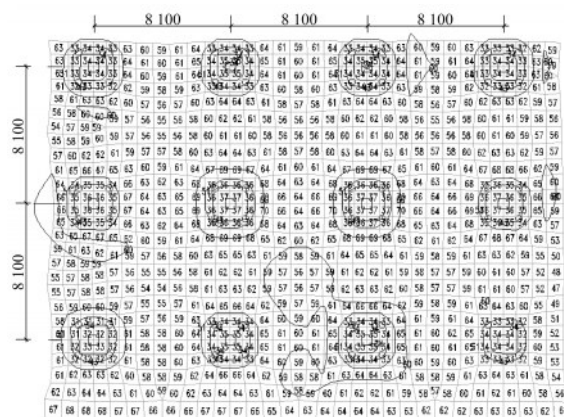


图5 基底压力图(工程局部示意)

Fig.5 Basement pressure diagram
(partial representation of the project)

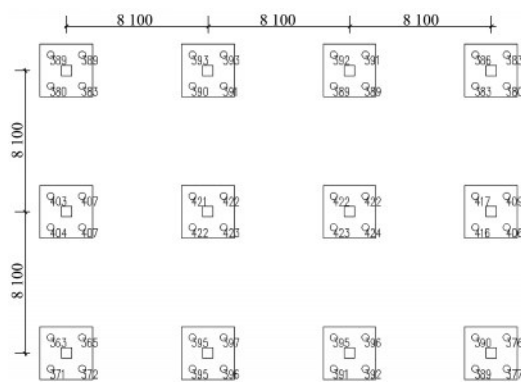


图6 桩竖向反力图(工程局部示意)

Fig.6 Pile vertical reaction force diagram
(partial representation of the project)

5 结 论

(1) 本文主要从工程实用角度出发, 根据规范及程序使用条件, 针对筏板下局部布桩形式的抗浮桩基, 力图做到抗浮和受压两种工况均较合理的计算。该方法是一种较为简化的算法, 也依赖于土基床系数、桩刚度系数以及承台效应系数等参数的细化取值, 这些会影响反力的分配, 但其理论依据清晰, 抗浮和受压时的稳定安全系数和整体安全度均是可以满足要求的。

(2) 局部设置复合地基的筏板不能用于抗浮, 但对于减沉也是一种很好的方法, 由于没有了承台效应, 其实现方法又有不同, 留待后续讨论。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗浮技术标准: JGJ 476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standards for building engineering: JGJ 476—2019[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020. (in Chinese)
- [2] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 知识产权出版社、中国水利水电出版社, 2004.
- Zai Jinmin. The theory and application of composite pile foundation [M]. Beijing: Intellectual Property Press, China Water Resources and Hydropower Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 上海市地基基础设计标准: DGJ08-11—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019.
- Shanghai Municipal Housing and Urban-Rural Construction Administration Commission. Foundation design standard of Shanghai foundation: DGJ08-11—2018[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2019. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for building pile foundation: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)