

扩径支盘混凝土灌注桩的设计

喻海文 林新阳
(广州市设计院 广州 510620)

摘 要 阐述扩径支盘混凝土灌注桩的作用机理,介绍其单桩竖向极限承载力计算的经验公式,并推导出单桩抗拔承载力计算公式,同时对桩的选型与布置提出建议。

关键词 扩径支盘灌注桩;承载力盘;承载力

1 扩径支盘灌注桩的定义和作用机理

扩径多分支承载力盘混凝土灌注桩,简称扩径支盘桩,是在普通等截面钻孔混凝土灌注桩的基础上发展而来的一种桩型,其主要特征是桩身带有多个承载力盘(扩大头)或分支,采用专用液压挤扩支盘成型机和钻孔桩机配套施工,产生的桩体、承载力盘和分支构造如图1所示。挤扩机在适宜土层中将承载力盘和分支挤扩成型,承载力盘直径较大,如桩径 $\phi 500\text{mm}$ 的桩体其承载力盘直径 ϕ 可达1400mm。

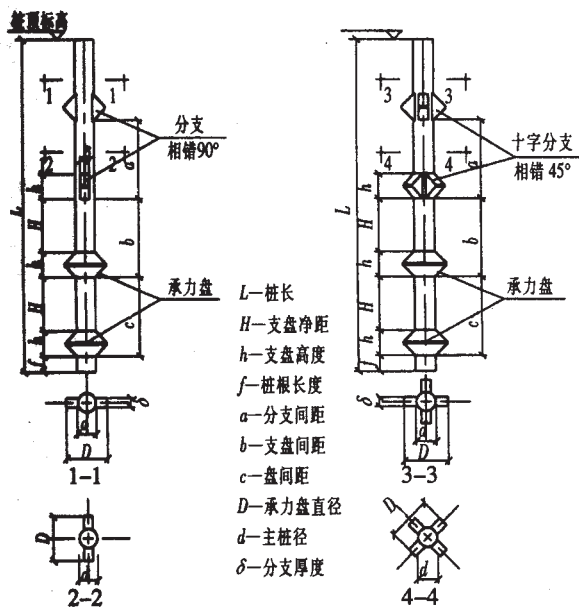


图1 扩径支盘桩构造图

扩径支盘桩通过液压设备的挤扩,对各分支和承载力盘周围土体施加三维静压而挤成支盘空腔,并与腔内灌注的混凝土桩身和支盘紧密结合为一体,充分发挥了桩土共同承力的作用。扩径支盘桩的承载力盘面积为桩身截面面积的3.55~6倍,若加上各盘环和各分支的面积则可增大至20倍。

普通钻孔混凝土灌注桩为等直径桩,其承载力一般不能充分发挥桩身的材料强度,且受制于持力层的土层强度;而扩径支盘混凝土灌注桩则能充分发挥桩身的材料强度,以及利用桩身上下各部位的硬土层,因而降低了对桩端持力层的要求,可缩短桩长和减少混凝土和钢筋用量。同时,该桩型还可根据承载力的需要,在桩身上下各部位的较硬土层中采取增加分支和承载力盘数量的方法来提高单桩承载力(包括竖向抗压、水平和抗拔承载力等)和桩身稳定性,从而改变了普通钻孔桩的受力机理,成为一种变截面的多支点摩擦端承桩。两种桩型的比较如图2所示。

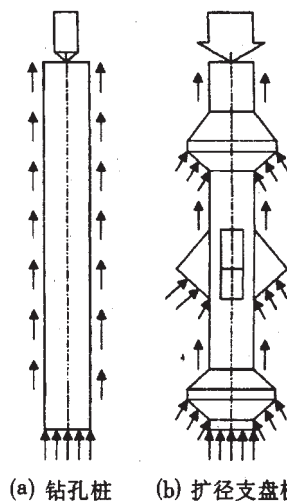


图2 两种桩型的承载力机理

在相同的持力层条件下,扩径支盘桩的基础沉降变形更小,其单方混凝土承载力为相应的等截面普通钻孔桩的2倍以上。作为一种部分挤土灌注桩,扩径支盘桩的承载力盘成型时对土体的挤压效果是非常明显的,其影响范围水平方向可达桩孔外1.0m处,垂直方向则在0.5m内,土的干密度的提高幅度最大可达15%~20%左右^[1]。

一般说来,普通钻孔桩的破坏形式为剪切刺入型,而扩径支盘桩则为渐进压缩型。大量的扩径支盘桩静载试验 $Q-s$ 曲线均呈缓变型,当加载至极限荷载的约50%或70%时,桩顶沉降速率反而变小,曲线斜率变缓,并非随荷载增大而变陡。其原因是桩侧摩阻力与各承载力盘端阻力在桩的受荷过程中,按变形协调原理在变化中交替发挥作用,使各承载力盘下压密的持力层土体沉降变形减小。图3为广州地铁

二号线瑶台主变电站工程扩径支盘桩的 37# 试桩静载试验 $Q-s$ 曲线。

荷载的传递与承力盘间距 c (见图 1) 有关, 当 $c < 2 \sim 2.5D$ (承力盘直径) 时, 各承力盘下的应力影响区延伸到下面的承力盘上, 形成互相叠加的公共应力区, 则承力盘间的土体可能被剪裂, 甚至塌落至下面承力盘的临空面缝隙中, 从而破坏了这一段桩土间的摩

擦力; 当承力盘间距 c 较大时, 各承力盘则单独工作。前者可认为是荷载沿承力盘外包圆柱面和端部承力盘的底面传递, 后者则是由桩身侧表面和各承力盘底面传递。分支的破坏机理与承力盘的不同之处在于分支与土层的接触面比承力盘小, 故会产生剪切破坏, 它对承载力的贡献是使侧阻力增大。

对于长径比较大 ($L/d \geq 15$) 的桩, 由于上部桩身 (包括上部承力盘) 先于下部桩身把大量荷载传递给较硬的上覆土层, 桩端和下部承力盘的荷载分担比例较小, 但如果桩体受荷继续增加, 桩体竖向位移继续增大, 上部桩身 (包括上部承力盘) 受力趋于极限值, 桩端和下部桩身 (包括下部承力盘) 的荷载分担就会迅速增加。对于长径比较小 ($L/d \leq 10$) 的桩, 且桩端的持力层为坚硬土层或强风化岩层时, 桩端的沉降较小, 桩顶位移的相当部分来自桩本身的弹性压缩变形, 此时桩侧摩阻力和上部承力盘的扩头阻力往往难以充分发挥。但在工程设计中还是尽可能将桩端置于坚硬的全风化土层或者强风化岩层中, 这样不仅能获得较高的安全储备, 也有利于控制桩的沉降。根据对 100 根以上的扩径支盘桩静载检测数据进行分析, 极限承载力中支承阻力即各承力盘和桩端分担荷载之和和所占比例达 50%~90%^[1]。

扩径支盘桩成桩工艺适用范围广, 适用于泥浆护壁成孔工艺或者干作业成孔工艺 (主要应用在北方一些地下水位很低的地方) 根据需要也可以采用水泥注浆护壁成孔和重锤捣扩成孔等工艺。扩径支盘桩在内陆冲积、洪积平原及沿海河口部位的海陆交替沉积三角洲平原下的硬塑粘性土、密实粉土、粉细砂层等均适合作为支盘桩基的持力层。若支、盘位置得当, 支盘桩就能充分利用各持力层而使单桩承载力得以充分发挥。高层建筑、大型工业厂房、水塔、

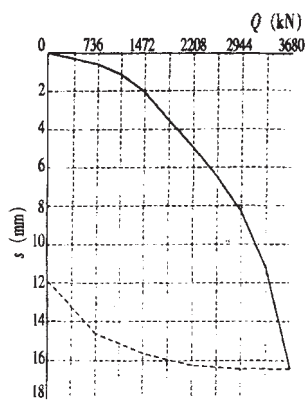


图 3 扩径支盘桩的静载试验 $Q-s$ 曲线

烟囱、电厂冷却塔、水厂清水池、市政立交桥、高架桥、复合地基、基坑支护等均可采用支盘桩基, 比较该桩型与普通泥浆护壁钻孔桩完成的等值承载力, 发现前者成孔后的泥浆排放量显著减少。

扩径支盘混凝土灌注桩从 1992 年开始在建筑工程中应用, 在国内已有 10 多个省市的 200 多项工程成功地采用了该桩型。

2 单桩竖向极限承载力计算

根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系, 估算扩径支盘桩单桩竖向极限承载力 Q_{uk} 时可按以下经验公式计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} \\ = u \sum \psi_{di} q_{sik} l_{si} + \sum \psi_{pi} \psi_{Di} q_{pik} A_{pi} + \psi_d q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中 Q_{sk} 、 Q_{pk} 分别为单桩总极限侧阻力标准值和单桩总极限端阻力标准值 (kN); u 为主桩桩身周长 (m);

ψ_{pi} 为承力盘极限端阻力标准值修正系数, 按不同土层选取, 硬塑粘土为 0.6~0.8, 可塑粘土、粉土为 0.8~1.0, 粉砂为 0.8~0.9, 细砂为 0.6~0.7, 中粗砂为 0.4~0.5;

ψ_{di} 、 ψ_{Di} 、 ψ_d 分别为桩身侧阻力和承力盘、桩端端阻力尺寸效应系数, 按不同土层选取, 粘性土和粉土 $\psi_{di} = 1$, $\psi_{Di} = (0.8/D)^{1/3}$, $\psi_d = (0.8/d)^{1/3}$, 砂土和碎石 $\psi_{di} = (0.8/d)^{1/3}$, $\psi_{Di} = (0.8/D)^{1/3}$, $\psi_d = (0.8/d)^{1/3}$, 当 d 、 $D < 0.8m$ 时以上尺寸效应系数取 1.0;

q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值 (kPa), 无当地经验值时可按规范^[2]表 5.2.8-1 取值;

l_{si} 为桩穿越第 i 层土的计算厚度 (m), 粘性土、粉土为 $H_i - 1.2h$, 砂土为 $H_i - (1.5 \sim 1.8)h$, 碎石、砾石为 $H_i - 1.8h$, 其它为 $H_i - (1.1 \sim 1.2)h$ (H_i 为土层厚度 h 为承力盘高度);

q_{pik} 、 q_{pk} 分别为各承力盘、桩端极限端阻力标准值 (kPa), 无当地经验值时可按规范^[2]表 5.2.8-2 取值; A_{pi} 为扣除桩身截面积的承力盘水平投影面积 (m^2); A_p 为桩端截面积 (m^2).

按照已有的工程经验, 扩径支盘桩的桩侧极限侧阻力标准值 q_{sik} 和桩端极限端阻力标准值 q_{pk} 可以直接参考钻 (冲) 孔桩相应的参数值, 各承力盘的极限端阻力标准值 q_{pik} 则可参考普通混凝土预制桩相应的参数值。

对桩数在 3 根以上的非端承桩复合桩基, 宜考虑桩群、土、承台的相互作用效应, 其复合桩基承载力设计值可按规范^[2]公式 5.2.2-3 的规定计算。

扩径支盘桩的单桩竖向承载力有时受限于桩身承载力,设计人员除了按照规范进行桩身承载力设计值验算外,对要进行静载试验桩的桩身极限承载力标准值进行验算,以免静载试验时桩身被压坏。

3 单桩抗拔承载力的确定

作为抗拔桩,该桩的最大优点是只需增加少量材料就能获得显著提高抗拔承载力的效果。

通常桩基承载力中的桩侧摩阻力部分随上拔荷载的增加开始逐渐增大,但一般在桩—土界面上相对位移达4~10mm时其相应侧壁摩阻力达到峰值,其后将逐渐下降。但扩径支盘桩在基础上拔过程中,承力盘上移挤压土体,土体对承力盘的反作用力一般也随上拔位移的增大而增大。即使桩侧摩阻力达到峰值后,承力盘的抗拔阻力还需继续增长,直至桩上拔位移量达到相当数值为止。承力盘抗拔阻力所担负的总上拔荷载中的百分比也是随上拔位移量的增大而逐渐增大。

扩径支盘桩的抗拔破坏形态与机理决定了不可能存在一种统一的可普遍使用的抗拔承载力计算公式,另外构成桩抗拔承载力的各部分因其发挥的不同步性而使得过于复杂的计算公式变得毫无意义。本文给出的计算公式尽可能与规范^[6]的公式一致。

对于扩径支盘桩,我们可以将不同深度的承力盘及其以上相邻桩段看成不同的浅、深基础,其界限取决于最上部承力盘以上的计算桩长或者承力盘的间距,并存在着—临界深度 H 。当基础深度(即桩的上拔计算长度 L)小于破坏面竖向临界深度 H 时,这种较短的桩称为浅基础;当 $L>H$ 时,桩上拔时基础滑动面将不延伸至地面上,而转化为土体内部的冲切和压缩,这种长桩称为深基础。

由于破坏面的形状复杂多变,在不同的几何尺寸条件下可能各不相同,而且还可能伴有渐进性破坏现象。本文采用 Meyerhof-Adams 推导扩底桩基础

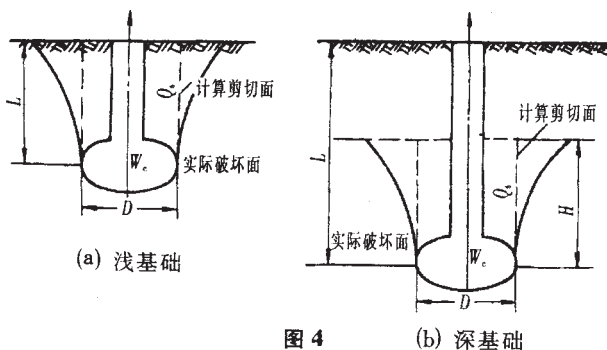


图4

(b) 深基础

表1 深、浅基础的界限值

φ (°)	20	25	30	35	40	45	50
H/D	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	11.0

抗拔承载力计算公式采用的竖圆柱形滑动面法,以代替实际可能发生的喇叭形倒圆锥台形滑动面,经简化后被称为“计算剪切面”,如图4所示,与一般扩底桩所不同的是该桩型可以有多个计算剪切面。

表1^[6]列出了与各种土类不同摩擦角值相对应的 H/D 极限值,其中 D 为桩扩大头或承力盘直径,凡桩段的长径比(l_i/D)未超出 H/D 极限值的一律按短基础考虑,反之则按深基础考虑。

参照规范^[6]的基桩抗拔极限承载力标准值计算公式5.2.18-1中对扩底桩破坏表面周长 u_i 的取值规定,自桩底起算的长度 $l_i \leq 5d$ (桩径) $\mu_i = \pi D$ (扩大头直径) $l_i > 5d$ $\mu_i = \pi d$ 。对照表1,该取值是偏于保守的,当土体摩擦角较大时,实际临界值 $H > 5d$ 。

扩径支盘桩最上部的承力盘及其以上部分桩段的抗拔计算与规范^[6]公式5.2.18-1完全相同,现讨论第1个承力盘以外的其他承力盘的情况。当扩径支盘桩相邻承力盘间距较小时,按规范取承力盘临界间距为 $5d$ (桩径),即如果盘间距 $\leq 5d$,则可认为受拔破坏时沿这部分桩身形成一个与承力盘直径相等的圆柱形“计算剪切面”。当相邻承力盘间距 $> 5d$ 时,可以认为受拔破坏时相邻承力盘之间桩段形成长 $5d$ 、直径为 D (承力盘直径)的圆柱形,以及该桩段剩余长度的直径为桩径 d 的圆柱形共同组成的“计算剪切面”。因此,单桩或群桩呈非整体破坏时,扩径支盘桩基桩的抗拔极限承载力 U_k 可按下式计算:

$$U_k = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_{si} \quad (2)$$

式中 λ_i 为抗拔系数,按规范^[6]中的表5.2.18-2取值; q_{sik} 为桩侧表面第 i 层土的抗压极限侧阻力标准值,按规范^[6]中的表5.2.8-1取值(kPa); μ_i 为扩径支盘桩破坏表面周长,当第1个承力盘盘底至地面距离,相邻承力盘盘底间距 $\leq 5d$ 时 $\mu_i = \pi D$,否则 $\mu_i = \pi d$; l_{si} 为桩穿越第 i 层土的计算厚度(m),计算取值同式(1)。

群桩呈整体破坏时,基桩的抗拔极限承载力标准值 U_{gk} 可按下式计算:

$$U_{gk} = n^{-1} u_1 \sum \lambda_i q_{sik} l_{si} \quad (3)$$

式中 u_1 为群桩外围周长(m)。

承受拔力的桩基应按下列公式同时验算群桩基础和基桩的抗拔承载力,并按有关规范验算基桩材料的受拉承载力,即:

$$\gamma_0 N \leq U_{gk} / \gamma_s + G_{gp} \quad (4)$$

$$\gamma_0 N \leq U_k / \gamma_s + G_p \quad (5)$$

式中: γ_0 为扩径支盘桩基的建筑物重要系数, 对于 1~3 级分别取 1.1, 1.0, 0.9, 柱下单桩按提高一级考虑, 柱下单桩的一级建筑取 1.2; N 为基桩上拔力设计值 (kN); γ_s 为桩侧阻抗力分项系数, 取 1.65; G_p 为群桩基础所包围体积的桩土总自重设计值除以总桩数, 地下水位以下取浮重度 (kN); G_p 为基桩 (土) 自重设计值地下水位以下取浮重度 (kN)。

4 桩基选型和布置

承力盘应设置在可塑~硬塑状粘性土或中~密实状态的砂土中, 硬土层的厚度宜在 1D 以上, 各项土力学指标宜满足下列要求, 即 $N_{63.5} > 15$ 击, $E_s > 7\text{MPa}$, $f_k > 150\text{kPa}$, $\rho < 0.7$, $I_L \leq 0.5$ 。

个别盘间距应留有余地, 一是在两盘之间加设分支, 二是满足分支改承力盘时的补救措施, 但均须满足最小间距的原则, 底盘下的桩根长度宜在 1d 以下, 且不小于设备端部机械的尺寸。

当遇到土层由硬变软时, 可适当增加支、盘的数量, 在钻试桩阶段可根据地层变化对支盘位置作适当调整。

分支以十字分支为主, 作为单桩承载力的补充, 分布在硬土或软土中, 如遇特殊情况, 可将它改为承力盘用以增加承载力或安全度。在桩上部的硬土或较硬土中设置十字分支, 可改善桩的水平承载力。单组分支一般作为增大桩的整体强度而设, 也可替代某些粘性土难于成型的十字分支, 设置时上、下层单组分支应呈十字交叉状。

至于分支与承力盘的竖向最小间距, 其控制原则为: 在粘性土和粉土中, 盘与盘之间、盘与分支之间

的间距 $\geq 2D$, 分支与分支之间的间距 $\geq 1D$; 在砂土中则分别 $\geq 2.5D$ 和 $1.5D$ 。为使桩身变形一致, 对土质差的承力盘可适当增大盘间距。

桩端进入硬持力层的深度为: 粘性土、粉土 $\geq 1.5 \sim 2d$, 砂土 $\geq 1.5d$, 碎石土 $\geq 0.75 \sim 1d$ 。桩基下持力层厚度 $\geq 3d$, 当存在软弱下卧层时 $\geq 4d$ 。桥涵桩基还应该满足冲刷深度要求。

扩径支盘桩的最小中心距取 3d 和 1.5D 中的较大值。

5 结语

2001 年 4 月, 扩径支盘灌注桩技术通过广州市建设新技术推广站组织的专家评审, 同年 8 月在广州地铁二号线瑶台主变电站成功应用, 取得了良好的技术和经济效益。

扩径支盘桩技术为桩基工程提供了一种新手段和新方法, 能适应复杂的工程要求, 是一种较为合理的桩型, 今后随着更多的工程应用和广大工程技术人员对其的进一步了解, 扩径支盘桩在广东地区必将得到更广泛的应用与发展。

参 考 文 献

- 1 中国水利水电科学研究院. 多分支承力盘成型装置支盘成型压密效果试验报告
- 2 北京市城建设计研究院. 地基基础工程, 第 9 卷, 第 1 期, 1999
- 3 JGJ 94-94 建筑桩基技术规范
- 4 史佩栋等. 实用桩基工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999

欢 迎 刊 登 广 告

本刊是全国公开发行的土木建筑类技术月刊, 发行量大, 所有封页及中间彩页均彩色精印。现承接发布本行业有关广告, 如贵单位拟在建设咨询、建筑施工、建筑材料、建筑机械、水暖空调设备、卫生陶器、室内装饰材料及防水材料等方面刊登广告, 欢迎与本刊编辑部联系。考虑到制版费用, 建议委托次数在 4 次以上, 若全年刊登将可获更优惠价格。欢迎来人、来电查询联系。

地 址: 广州先烈东路 121 号 邮 编: 510500

电 话: (020) 87252521

传 真: (020) 87252633