

# 多节扩孔灌注桩的挤扩效应及形成机理

吴兴龙 闫军

魏章和 李光茂

(武汉水利电力大学土建学院,武汉 430072) (机械工业部第三勘察研究院,武汉 430030)

**【摘要】** 考虑 DX 桩的实际受力性状,得出了桩基承载力扩大盘周边土体的应力应变及位移分析的解析解,基本反映了土体在挤扩过程中的运动规律,并分析了 DX 桩承载力扩大盘(或支)的形成机理。

**【关键词】** 多节挤扩灌注桩;承载力扩大盘;挤扩

**【中图分类号】** TU473.1

**【Abstract】** An analytical solution for bearing enlarging disk of the DX pile based on its actual bearing characteristic is presented. The result reflects the stress-strain relationship and displacement of the soils near the pile's bearing enlarging disk and basically predicts the moving law of the soils while squeezed. Then the forming mechanism is analyzed.

**【Key words】** mult-grade squeezed cast-in-place pile; bearing enlarging disk; squeeze

## 0 引言

多节挤扩灌注桩,又名挤扩多支盘桩,简称 DX 桩。它是在原等截面混凝土灌注桩的基础上发展起来的一种变截面钻孔灌注桩。其施工工序是在成孔后,吊入专用的挤扩设备,通过地面液压站控制的挤扩设备的分支臂扩张和收缩及机头自动旋转,在桩身预设计标高处形成圆台状的扩大盘(称为承载力扩大盘,见图 1 A-A)或对称分布的扩大分支(称为承载力扩大支,见图 1 B-B)。由于扩大了桩身多个断面直径,增大了桩的承载面积,达到提高单桩承载力,也改善了基桩与桩基的应力分布,进而达到减少沉降的目的。

多节扩孔灌注桩应用的专利挤扩设备,是改进后的第三代智能型多功能双向三支挤扩机(第一代产品是靠冲击锤锤出两支的简易设备,第二代产品为单向液压油缸两支挤扩机)。它改进了第二代挤扩机单向液压油缸两臂装置系统,并装置了液压自动旋转系统、压力传感器、角度传感器、位移传感器等

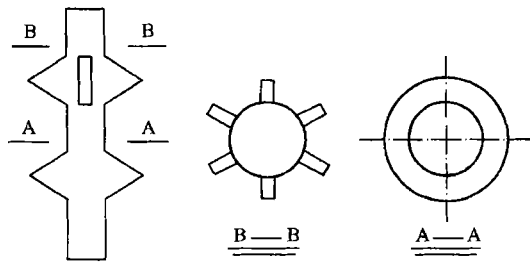


图 1 承载力扩大盘与扩大支

装置,实现了地面智能化操作。通过改进后装置的双向液压油缸,推动上、下分支臂铰点只作水平向(即径向)的扩张和收缩,使得弓压臂始终对土体进行水平方向挤压,弓压臂挤压土体无脱空现象。

## 1 DX 桩挤扩过程桩周边土体应力应变解析

DX 桩在挤扩过程中对桩周土所产生的侧向挤压应力,引起土的挤密,挤密的程度与下列因素有关:①土层的埋深;②土层的性质;③桩间距离。

作者简介:吴兴龙,1975年生,男,武汉水利电力大学岩土工程专业硕士研究生。

对于有一定埋深的土层,挤扩过程对桩周土体挤压的应力应变状态,可以近似地用轴对称的半无限体小孔扩张的弹塑性理论<sup>[1]</sup>描述,其假定条件如下:

- ①土是均匀各向同性的理想弹塑性体;
- ②饱和土在不排水情况下,瞬时应力不引起土体体积变化(见图2)。

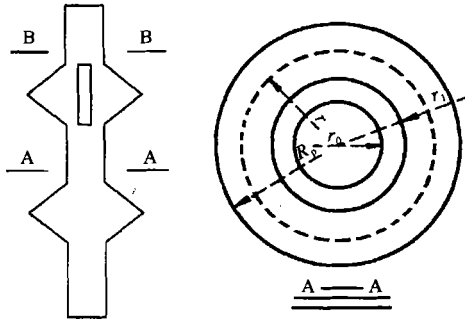


图2 挤扩时扩大头周边土体的应力状态

$$\Delta V = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z = 0 \quad (1)$$

式中: $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$  分别表示在  $r$  方向,  $\theta$  方向和  $z$  方向的正应变,  $m$ ;

- ③土体符合摩尔-库仑准则,在不排水情况下,土体的屈服条件可写为<sup>[2]</sup>(见图3):

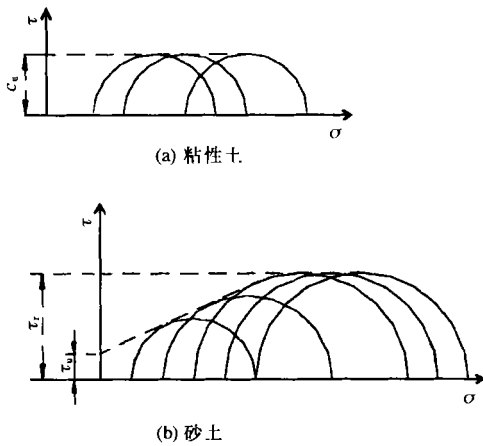


图3 饱和土三轴不排水强度包线

粘性土:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 2c_u \quad (2)$

砂土 低围压时:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_u / \cos \varphi \quad (3a)$

高围压时:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_r \quad (3b)$

式中: $\sigma_1, \sigma_3$ ——分别表示土体的最大主应力及最小主应力, kPa;

$c_u$ ——粘性土不排水抗剪强度, kPa;

$\tau_u, \varphi$ ——分别为砂土在低围压时的不排水抗剪强度和内摩擦角, kPa, ( $^\circ$ );

$\tau_r$ ——砂土在高围压时的不排水抗剪强度, kPa。

在工程应用中,砂土的抗剪强度通常都在低围压范围。

边界条件:  $r = r_0, \sigma_r = p_u$

在柱坐标下,满足条件①时,土体微分的平衡方程可写为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$$

式中: $\sigma_r, \sigma_\theta$  分别表示柱坐标下的径向应力及切向应力。

由式(1)及弹性区与塑性区边界( $r = R_p$ )上剪应变的相容条件:

$$\epsilon_r - \epsilon_\theta = \gamma = \frac{2(1 + \nu)}{E_0} \cdot \tau_u \quad (5)$$

解式(2)、(4)及(5)得塑性区半径  $R_p$ :

$$R_p = r_0 \cdot \sqrt{\frac{E_0}{2(1 + \nu) \cdot c_u}} \quad (6)$$

轴对称下平面极坐标应变的几何方程:

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r}; \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

式中: $u, w$  分别表示一点在径向( $r$ 方向)以及轴向( $z$ 方向)的位移。

显然,当  $r = r_0$  时,

$$u_p = -\frac{1 + \mu}{E_0} \cdot c_u \cdot R_p \quad (7)$$

$$w = -\frac{2(1 + \mu)}{E_0} \cdot c_u \cdot z \quad (8)$$

如引入  $\theta = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z, \lambda = E\mu / [(1 + \mu) \times$

$(1-2\mu)]$ ,并注意到  $2G = E/(1+\mu)$

则有拉梅公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \lambda\theta + 2G\epsilon_r \\ \sigma_\theta &= \lambda\theta + 2G\epsilon_\theta \\ \sigma_z &= \lambda\theta + 2G\epsilon_z \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据式(2),(3),附加挤压应力可写为:

$$\frac{\sigma_r}{k} = 1 + 2 \ln \frac{R_p}{r} = p_u - 2c_u \ln \frac{r}{r_0} \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{k} = 1 - 2 \ln \frac{R_p}{r} = p_u - 2c_u \left( \frac{r}{r_0} + 1 \right) \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_z}{k} = -2c_u \quad (12)$$

式中:粘性土: $k = c_u$ , kPa;

砂土:低围压时, $k = \tau_u / \cos \varphi$ , kPa;

高围压时, $k = \tau_r$ , kPa。

$r_0$ ——桩径, m;

$r$ ——土体塑性区任一点离桩孔中心距离, m;

$\mu, E_0$ ——分别为土的泊松比和变形模量。

由式(10)、(11)、(12)可知,  $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$ , 最大竖向挤压应力发生在桩边:

$$p_u = k \cdot \left( 1 + 2 \ln \frac{R_p}{r_0} \right) \quad (13)$$

由式(6)、(10)、(11)、(12)及(13)可知, 对于粉质粘土及粉砂来说, 其塑性区半径  $R_p$  及最大径向挤压应力  $p_u$  及最大竖向挤压应力  $\sigma_z$  估算值见表1。根据式(10)、(11)及(12), 当  $r = 0.223R_p$  时, 竖向挤压应力  $\sigma_z$  等于切向挤压应力  $\sigma_\theta$ 。当  $r > 0.223R_p$  时, 竖向挤压应力  $\sigma_z$  也大于切向挤压应力  $\sigma_\theta$ 。

表1  $R_p$ 、 $p_u$  及  $\sigma_z$  估算值

物理力学指标 土体类型	$\mu$	$E_0$ /MPa	$c_u$ /kPa	$\varphi$ (°)	$R_p$ /r	$p_u$ /kPa	$\sigma_z$ /kPa
粉质粘土	0.30	5.4	38		7.4	190	76
粉砂	0.25	10.8	110	30	6.3	593	220

挤扩过程对桩周土所引起的附加应力同

时也引起超孔隙水压力  $\Delta u$ , 考虑中主应力  $\sigma_r$  的影响<sup>[2]</sup>,

$$\Delta u = \Delta \sigma_{oct} + 3\alpha \cdot \Delta \tau_{oct} \quad (14)$$

式中: $\Delta \sigma_{oct}, \Delta \tau_{oct}$  分别为八面体平均正应力增量及平均剪应力增量, 系数  $\alpha$  由试验确定, 孔隙水压力  $\Delta u$  也可用不考虑中主应力影响的近似公式估算:

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (15)$$

将式(10)、(11)及(12)代入(15), 得:

$$\Delta u = k \cdot \left( \ln \frac{E_0}{2(1+\mu) \cdot \tau_u} + 2A - 1 \right) \quad (16)$$

由于孔隙水压力系数  $A$  一般小于1,

故

$$\Delta u < k \cdot \left( \ln \frac{E_0}{2(1+\mu) \cdot \tau_u} + 1 \right) \quad (17)$$

所估算的超孔隙水压力  $\Delta u$ , 实际上就是桩边最大竖向挤压应力  $p_u$ 。在挤扩过程中, DX 桩扩大头周围的土体被排挤, 在扩大头周围的土体强烈扰动区内, 由于较大的挤扩应力而引起的超孔隙水压力相当快地消失。靠近扩大头的土体固结后, 与离开扩大头一定距离的土体比较, 可能会有较高的抗剪强度及较低的含水量。但是, 对于非常灵敏的粘土或者在超固结的硬粘土中, 最终的抗剪强度或桩上的附着力可能要比原状土要低些。

## 2 DX 桩承力扩大盘(或支)的形成机理

DX 桩在挤扩过程中, 在地面液压站控制的分支臂扩张的荷载作用下, 靠近分支臂周围的土体, 相当于携带了一定的能量。这部分土体在移动过程中需克服周围土体的阻力, 将一部分能量传给周围的土体, 其本身携带的能量逐渐减小, 直到和土阻力平衡。此时, 分支臂周边土体达到暂时相对平衡。随着分支臂的进一步扩展, 其周边土体的暂时相对平衡遭到破坏, 分支臂周边土体携带比上次更多的能量, 对前面的土体有一种前推的作用, 强迫前面的土体继续运动, 相应地也就增加了承力扩大盘的塑性区半径。随着承

力扩大头的增大,土体被挤密,土的压缩模量  $E$  逐渐增大。这种挤压的结果使得承力扩大盘周围土体的密度变大,形成合理结构,增加承力盘的端承力。土体密度的增大,使承力盘的侧摩阻力增大,承力盘的端承力也增大。挤扩作用又使土的本构关系发生变化,原来均质的结构变成一种复杂而又合理的状态。土的内摩擦角增大,变形模量增大,承载能力也相应增大。在挤扩过程中,土体内部的松散排列将先发生溃散,然后紧密排列的也发生溃散。挤扩到一定的阶段时,当颗粒的接触点破碎时,原已紧密的排列,又被挤压成更紧靠在一起。土体的这种重新定向排列提高了承力盘的承载力。随着分支臂的扩张,分支臂周围的土体被挤密,土体的压缩模量  $E$  相应地增大,土体侧压力系数  $\zeta$  也有所增加。在工程实践中,分支臂的扩张角度主要考虑土层性质、挤扩成型和经济指标而定,而不是无限制的增大扩张角。

### 3 DX 桩挤扩效应的有关讨论

#### 3.1 挤扩效应对桩侧摩阻力的影响

DX 桩在挤扩过程中,一方面,土体密度的增大,使承力盘的侧摩阻力增大;另一方面,挤扩产生的超孔隙水压力,使得承力盘周围的土体重新固结。承力扩大盘周边土体被挤密,土的内摩擦角增大,其周边土体的侧压力系数  $\zeta$  增加,相应地,增加了桩的承力扩大盘下部的侧摩阻力。承力扩大盘周围土体被挤密,使得承力扩大盘周围土体的密度变大,形成合理结构,增加承力盘的端承力。在挤扩过程中,土体内部的松散排列将先发生溃散,然后紧密排列的也发生溃散。挤扩到一定的阶段时,当颗粒的接触点破碎时,原已紧密的排列,又被挤压成更紧靠在一起。土体的这种重新定向排列提高了承力盘的承载力。

#### 3.2 挤扩效应对桩端承力的影响

在 DX 桩承力扩大盘的形成过程中,承力扩大盘周边土体被挤密,土的内摩擦角增

大,土体的压缩模量增大,承载能力也相应增大。挤压的结果使得承力扩大盘周围土体的密度变大,增加承力盘的端承力。地基土承载力提高幅度的大小可用综合系数  $\beta$  来反映, $\beta$  值的大小可以通过现场试验确定<sup>[4]</sup>。分支或盘周边土体的挤密作用是 DX 桩承载力大幅度提高的重要因素,也是 DX 桩与钻孔扩底桩、扩底墩的主要区别。

### 4 结 语

1)结合 DX 桩的实际受力性状,认为其竖向应变  $\epsilon_z \neq 0$ ,得出  $\sigma_1 > \sigma_z > \sigma_3$  的结论,基本反映了土体在挤扩过程中的运动规律。

2)DX 桩承力扩大盘(或支)的形成过程就是携带能量的支或盘周边土体克服土阻力运动而消耗能量的过程,DX 桩的扩大头不能无限制的增大,它受到土体的压缩模量  $E$  和土体侧压力系数  $\zeta$  的制约。

3)在 DX 桩的设计施工过程中,应综合考虑施工条件、地质条件和荷载大小等因素,来设置支或盘的位置和间距,密切结合实际情况,确保承力扩大盘(或支)的成桩质量,最大限度地提高 DX 桩的承载力。

4)DX 桩能有效挖掘地基潜力,改善支盘周边土体的力学性能,提高支盘周边土体的承载力,且桩的单位立方米混凝土承载力成倍提高。与普通混凝土灌注桩相比,可节约原材料约 30%,节省桩基总造价 20%~30%,有效地降低工程造价,缩短工期,是一种值得推广的新桩型。

### 参 考 文 献

- 1 曾国熙等. 桩基工程性质. 北京:中国建筑工程工业出版社,1995.20~21
- 2 黄文熙. 土的工程性质. 北京:水利电力出版社,1983.49~51,70~75
- 3 徐秉业,刘信声. 应用弹塑性力学. 北京:清华大学出版社,1995.84~88,194~197
- 4 史鸿林等. 新型挤扩分支桩的计算与试验研究. 建筑结构学报,1997,18(1):49~54

收稿日期:1999-09-20