

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.014

# 冲孔灌注桩孔底岩土体破坏机理及冲锤选型分析

程万里

(北京城建设计发展集团股份有限公司,北京 100037)

**摘要:**通过分析冲孔灌注桩的中空冲击钻头结构和孔底岩土体破坏机理;基于落石冲击力计算相关研究成果,给出了冲锤对井孔底的冲击力计算。基于 Mindlin 课题基本解通过积分建立环形荷载作用下孔底岩土体力学模型。根据黏土层、砂卵石层、岩层典型地层的物理力学参数和桩孔大小模拟出孔底范围岩土体合理的塑性区边界,分析得出合理的冲锤质量及喇叭头外径;为配置合理的中空冲击钻头提供依据。

**关键词:**冲孔灌注桩;冲击力计算;中空冲击钻头

**中图分类号:** TU473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2019)05—0083—06

## Failure Mechanism Analysis of Rock and Soil in the Bottom of the Impact-cone Concrete Pile and the Selection of the Punching Hammer

CHENG Wanli

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract:** By analyzing the structure of the hollowed punching hammer and the failure mechanism of rock and soil in the bottom of the impact-cone concrete pile, based on the calculation on the falling stone impulsive force, the impact of hammer on the bottom of well hole was calculated. The mechanics model of porous subsoil under circular load was established based on the basic solution of the Mindlin problem. Based on the physical and mechanical parameters and pile hole size of typical strata of clay layer, sand ovale layer and rock formation, the reasonable plastic zone boundary of rock and soil in the hole bottom area was simulated.

**Keywords:** impact-cone concrete pile; calculation of impact force; hollowed punching hammer

伴随冲击式钻机的更新,钻机起吊冲锤的能力也随之提升,冲锤冲击掘进过程中其质量的选择范围也更为宽泛。冲锤质量主要由芯管和加重肋板的质量来决定,在一定程度上大质量的冲锤需要大直径的芯管为其提供载体;通过选择大直径的加厚铸钢芯管,外绷焊加重钢肋板,进而获得大质量的冲锤。冲击式钻机依靠冲锤的上下往复运动冲击井孔底岩土体形成泥浆混合物排出井孔获得进尺,为了片面地追求快速掘进而获得更多经济利益,不少作业队伍选用质量过大的冲锤和喇叭头过大的芯管。冲锤质量的增加可在一定程度上提高冲锤的掘进速

度,但大质量、大喇叭头芯管的冲锤对井孔底岩土体施加的冲击影响过大,破坏了井底孔壁的完整性甚至造成孔壁失稳引发塌孔、埋钻等事故。设计终孔深度以下的岩土体受到冲锤的冲击作用,形成一定的塑性区范围,表现为桩底虚土<sup>[1]</sup>。桩底沉渣及虚土对桩基承载力的削弱可通过灌注桩后压浆技术得到加强<sup>[2-4]</sup>。

### 1 中空冲击钻头

将下端带有喇叭头的高强度铸钢管作为芯管,在芯管外围对称地绷焊4~12根加重钢肋板形成中

空冲击钻头的主体结构。根据实际施工的桩孔径和地质情况,在加重钢肋板上焊接高低交错的加宽肋板以便翻浆护孔,并在加宽肋板外围焊接弧形导正圈以保证孔壁的圆整<sup>[5]</sup>(见图 1)。

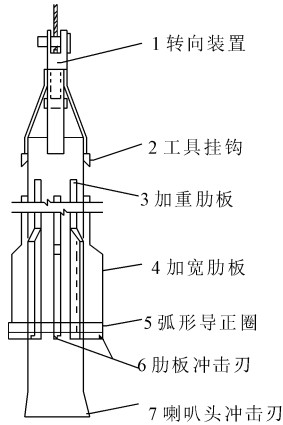


图 1 中空冲击钻头

### 1.1 喇叭头冲击刃

冲击钻机通过拐臂连接冲击梁及前游轮带动主钢丝绳端固定的中空冲击钻头上下往复地冲击破碎井孔底岩土体获得进尺,同时兼顾了孔壁的稳定。将井孔底岩土体的冲击破碎分为孔底核心部位强力破碎和孔周保护性微裂破碎的分部位破碎<sup>[6]</sup>。

中空冲击钻头的喇叭头在冲击掘进过程中起到的作用<sup>[1]</sup>:

(1) 通过喇叭头的预先掘进实现了井孔的分级钻进,在喇叭头的冲击作用下,井孔底核心区形成圆形的超前导坑。超前导坑对冲锤具有导向作用,保证冲锤的各个冲击刃同时冲击孔底,避免因冲锤的部分冲击刃先接触孔底造成冲锤过度摇摆,进而保证冲击能同时作用于孔底。

(2) 冲锤的冲击能集中的作用在超前导坑下方的岩土体上,巨大的冲击力使孔底超前导坑下方发生整体性破碎;由于超前导坑外围岩土体的隔离保护,井孔壁土受到了挤压密实。

(3) 喇叭头的倒锥形内腔对孔底岩土体具有聚挤作用,并对进入其内腔的块石具有挤压破碎作用,通过块石间的相互挤压,加快了块石的破碎过程。孔底的岩土体块、稠泥浆挤入喇叭头内腔的同时,芯管内的稠泥浆则通过其顶口翻出,芯管外的新鲜泥浆下沉。

(4) 在提升冲锤时,加宽肋板和导正圈切削至芯管外围的碎石土随同喇叭头的拖动一起离开孔底,与新鲜的泥浆混合。通过正循环排渣工艺不断

泵送新鲜泥浆至井孔底,并将携带钻渣的稠泥浆返至地面沉渣坑。

### 1.2 加宽肋板和弧形导正圈

在掘进不同孔径的井孔前,根据孔径大小在冲锤的加重肋板上对称的焊接加宽肋板,肋板底焊接高强度耐磨损钢材作为冲击刃,切削破碎喇叭头外围孔壁范围内的岩土体。在掘进黏土层时,为加快对井孔底黏土块体的搅动、切削,避免粘钻;加宽肋板个数不宜过多,环形扩刀采用短弧形高低交错布置。在掘进硬层时,可通过增加加重肋板,进而增加冲锤的质量,加快破碎岩土体。

弧形导正圈的设置起到校正对中的作用,避免了冲锤在上下往复运动过程中偏离井孔中轴线。通过环形扩刀闭合肋板冲击刃,共同切削裸露在孔中的岩土体,保证了桩孔的圆整<sup>[1]</sup>。

### 1.3 冲锤冲击孔底岩土体的冲击力

冲锤在井孔中的下落加速度受到岩粉浆的影响。Labrousse 等通过落石冲击试验,构建出落石冲击力计算的公式<sup>[7-10]</sup>。本文提出应用于井孔中冲锤冲击孔底岩土体的冲击力计算公式。

$$p = 1.765 \times E_0^{\frac{2}{5}} \times R^{\frac{1}{5}} \times (mjH)^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

式中: $R$ 为喇叭头冲击刃半径,m; $H$ 为冲锤冲程,m; $j$ 为孔底冲锤下落加速度, $m/s^2$ ; $m$ 为冲锤的质量,t; $E_0$ 为井孔底岩土体变形模量,kPa。

## 2 井孔底岩土体环形荷载受力模型

### 2.1 基本假设

(1) 喇叭头冲击刃对井孔底的静压力,满足井孔中冲锤冲击岩土体的冲击力计算公式。

(2) 冲锤对井孔底的冲击力,简化为喇叭头环形冲击刃对孔底的均布静荷载,不计加宽肋板和环形扩刀的冲击作用。

(3) 根据 Mindlin 基本解<sup>[8]</sup>进行数理积分,计算出环形荷载作用下井孔底周围岩土体中任意一点的 6 个附加应力状态  $\sigma_x''$ 、 $\sigma_y''$ 、 $\sigma_z''$ 、 $\tau_{yz}''$ 、 $\tau_{zx}''$ 、 $\tau_{xy}''$ ,忽略井孔对 Mindlin 基本解的影响。

(4) 分析环形荷载作用下井孔底岩土体破坏范围,屈服准则满足土力学中的莫尔 - 库仑准则。

### 2.2 模型建立

(1) 根据假设,环形荷载和井孔均属轴对称模型。因此,将岩土体的网格划分由空间简化为沿井孔轴线的半个竖直平面模型作计算分析<sup>[11]</sup>。运用数学计算软件——Mathe - matica 的循环计算功能,计

算出模型中每个网格节点的 6 个附加应力。取井孔底范围竖直平面 - 面  $yo_z$  为计算平面,将面  $yo_z$  划分为  $m \times m$  网格,如图 2 所示。

(2) 网格节点的应力状态。根据 Mindlin 解的基本公式,对于网格节点上的每个计算点  $(0, y_0, z_0)$  应用  $\sigma''_x, \sigma''_y, \sigma''_z, \tau''_{yz}, \tau''_{zx}, \tau''_{xy}$  基本公式对外径为  $R$ 、内径为  $r$  的环形静荷载下的每一点  $(x_i, y_j, h)$  进行积分,得出环形均布荷载作用下井孔底周围岩土体中任意一点的 6 个附加应力状态  $\sigma''_x, \sigma''_y, \sigma''_z, \tau''_{yz}, \tau''_{zx}, \tau''_{xy}$  :

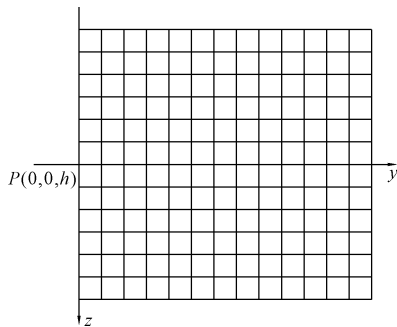


图 2 孔底范围内  $yo_z$  平面网格划分

$$\sigma''_x = \int_0^R \int_{-\sqrt{r_1^2-y^2}}^{\sqrt{r_1^2-y^2}} \left[ \frac{p}{8\pi(1-\mu)} \left[ \frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_1^3} - \frac{3x^2(z-h)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-h)-4\mu(z+h)]}{R_2^3} \right] - \frac{3(3-4\mu)x^2(z-h) - 6h(z+h)[(1-2\mu)z-2\mu h]}{R_1^3} - \frac{30cx^2z(z+h)}{R_2^7} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+h)} \left( 1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+h)} - \frac{x^2}{R_2^2} \right) \right] dx dy - \int_0^r \int_{-\sqrt{r_0^2-y^2}}^{\sqrt{r_0^2-y^2}} \left[ \frac{p}{8\pi(1-\mu)} \left[ \frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_1^3} - \frac{3x^2(z-h)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-h)-4\mu(z+h)]}{R_2^3} \right] - \frac{3(3-4\mu)x^2(z-h) - 6h(z+h)[(1-2\mu)z-2\mu h]}{R_1^3} - \frac{30cx^2z(z+h)}{R_2^7} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+h)} \left( 1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+h)} - \frac{x^2}{R_2^2} \right) \right] dx dy$$

$$\sigma''_y = \int_0^R \int_{-\sqrt{r_1^2-y^2}}^{\sqrt{r_1^2-y^2}} \sigma''_y dx dy - \int_0^r \int_{-\sqrt{r_0^2-y^2}}^{\sqrt{r_0^2-y^2}} \sigma''_y dx dy$$

$$\sigma''_z = \int_0^R \int_{-\sqrt{r_1^2-y^2}}^{\sqrt{r_1^2-y^2}} \sigma''_z dx dy - \int_0^r \int_{-\sqrt{r_0^2-y^2}}^{\sqrt{r_0^2-y^2}} \sigma''_z dx dy$$

$$\tau''_{yz} = \int_0^R \int_{-\sqrt{r_1^2-y^2}}^{\sqrt{r_1^2-y^2}} \tau''_{yz} dx dy - \int_0^r \int_{-\sqrt{r_0^2-y^2}}^{\sqrt{r_0^2-y^2}} \tau''_{yz} dx dy$$

$$\tau''_{zx} = \int_0^R \int_{-\sqrt{r_1^2-y^2}}^{\sqrt{r_1^2-y^2}} \tau''_{zx} dx dy - \int_0^r \int_{-\sqrt{r_0^2-y^2}}^{\sqrt{r_0^2-y^2}} \tau''_{zx} dx dy$$

$$\tau''_{xy} = \int_0^R \int_{-\sqrt{r_1^2-y^2}}^{\sqrt{r_1^2-y^2}} \tau''_{xy} dx dy - \int_0^r \int_{-\sqrt{r_0^2-y^2}}^{\sqrt{r_0^2-y^2}} \tau''_{xy} dx dy$$

式中:  $R_1 = \sqrt{r^2 + (z-h)^2}$   $R_2 = \sqrt{r^2 + (z+h)^2}$

$r = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - 0)^2}$ ;  $R_1$  为计算点  $(0, y_0, z_0)$  到力作用点  $(x_i, y_i, h)$  的距离;  $R_2$  为计算点  $(0, y_0, z_0)$  到力作用点的地面对称点  $(x_i, y_i, -h)$  的距离;  $r$  为计算点  $(0, y_0, z_0)$  到力的作用点  $(x_i, y_i, h)$  的水平距离;  $p$  为环形荷载, kPa;  $\mu$  为岩土体的泊松比;  $z$  为计算点离地面的深度。

井孔范围内的孔底岩土体还受孔内泥浆的静压力,井孔以外范围的岩土体计算点受上覆盖层的地层静压力:

① 计算点  $(x_0, 0, z)$  在井孔范围内,即  $x_0 < D/2$  且  $z > h$  时有:

$$\sigma_x = \sigma''_x + K_0 \gamma z, \quad \sigma_y = \sigma''_y + K_0 \gamma z, \quad \sigma_z = \sigma''_z + \gamma_m z$$

$$\tau_{yz} = \tau''_{yz}, \quad \tau_{zx} = \tau''_{zx}, \quad \tau_{xy} = \tau''_{xy} \quad (3)$$

② 计算点  $(x_0, 0, z)$  在井孔范围外,即  $x_0 > D/2$  有:

$$\sigma_x = \sigma''_x + K_0 \gamma z, \quad \sigma_y = \sigma''_y + K_0 \gamma z, \quad \sigma_z = \sigma''_z + \gamma z$$

$$\tau_{yz} = \tau''_{yz}, \quad \tau_{zx} = \tau''_{zx}, \quad \tau_{xy} = \tau''_{xy} \quad (4)$$

式中:  $\gamma_m$  为泥浆重度;  $\gamma$  为土体重度;  $K_0$  为岩土体的侧压力系数,  $K_0 = 1 - \sin \varphi$ 。

根据剪应力互等定理得:  $\tau_{xy} = \tau_{yz}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ 。井孔底周围的岩土体计算点的全部应力状态可用矩阵表示为:

$$F = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

即为中空冲击钻头环形荷载作用下孔底岩土体受力模型计算式。

### 2.3 孔底破坏范围

运用 Mathe - matica 数学计算软件里的最大(小)特征值命令函数  $\max[\text{Eigenvalues}[F]]$  计算出  $yo_z$  平面内每个网格节点的主应力  $\sigma_1, \sigma_3$ , 计算出网格节点的最大剪应力  $\tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$ ; 为判别网

格节点是否破坏,将网格节点计算的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 同按照莫尔-库仑准则“极限平衡条件”计算得出的剪应力进行相减判别:

$$w = \tau_{\max} - \left( \frac{c}{\tan\varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \sin\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \left( \frac{c}{\tan\varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \sin\varphi$$

式中: $\varphi$ 为井底岩土体的内摩擦角; $c$ 为井底岩土体的黏聚力。

(1) 若 $w > 0$ ,说明该网格节点的岩土体已破坏。

(2) 若 $w = 0$ ,说明该网格节点在切点所代表的平面上剪应力恰好等于岩土体的抗剪强度,该点处于极限平衡状态。

(3) 若 $w < 0$ ,说明该网格节点在任何平面上的剪应力均小于岩土体所能发挥的抗剪强度,该点未破坏。

根据在喇叭头冲击刃的环形荷载作用下井孔底范围各网格节点的岩土体破坏值的大小,分析井孔底岩土体的破坏范围及破坏程度;据此得出孔底岩土体的塑性区边界。

## 3 典型地层中冲锤的选择

### 3.1 黏土层

黏土层的典型特征是土体的内摩擦角、变形模量均较小,抗压强度也较低,但黏土层的黏性大,表现为泊松比和黏聚力数值都较高。冲击钻机在黏土层中掘进配合捞渣桶排渣时,往往因孔底泥浆过稠不能及时置换新鲜浆液,出现粘钻造成冲锤下落加速度过小而中断掘进,需待吊出冲锤、下放捞渣桶捞渣后再次掘进。若配备正循环法不间断地泵送新鲜泥浆至孔底将黏土块及稠泥浆翻出井底循环至地表沉渣池的排渣工艺,将大大加快掘进速度。黏土层的物理力学参数<sup>[12-15]</sup>见表1。

表1 黏土层物理力学参数

内摩擦角 / $^{\circ}$	黏聚力 /kPa	泊松比	变形模量 $E_0$ /MPa
16	70	0.32	20

将表1中黏土层的物理力学参数代入冲击力计算公式、孔底岩土体受力模型计算式,数值拟合出孔底岩土体的塑性区边界。根据拟定的桩孔直径、冲锤质量、喇叭头外径,分别拟合出黏土层中不同孔径的井孔底合理的塑性区范围(见图3);为黏土层中

不同孔径掘进的冲锤选型提供配置参数(见表2)。

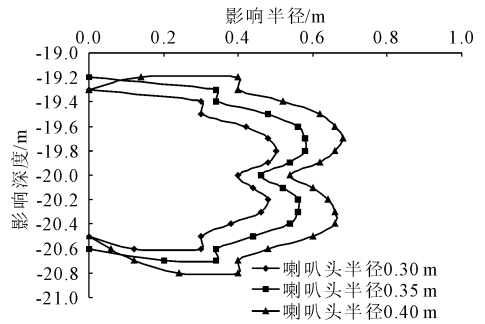


图3 直径为0.8 m、1.0 m、1.2 m的井孔底黏土层塑性区范围

拟合出的合理塑性区范围:桩孔半径为0.4 m时,塑性区宽度为0.48 m,深度为0.5 m;桩孔半径为0.5 m时,塑性区宽度为0.58 m,深度为0.7 m;桩孔半径为0.6 m时,塑性区宽度为0.68 m,深度为0.8 m。

表2 不同孔径的黏土层中冲锤参数

桩孔直径/m	冲锤冲程/m	冲锤冲击加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	井孔深/m	冲锤质量/t	环形荷载/kPa	喇叭头外径/m
0.8	1.1	7	20	2.2	4609.65	0.6
1.0	1.1	7	20	3.0	4845.35	0.7
1.2	1.1	7	20	3.7	4891.30	0.8

黏土层井孔底的塑性区边界近似地呈喇叭头冲击刃平面(井孔深20 m的平面)上下对称、沿桩轴线对称分布的封闭空间。冲击刃半径的增加,对扩大塑性区宽度影响显著,对塑性区高度的影响不是很明显。受拉应力的作用,冲击刃平面上方岩土体的塑性区高度比下方岩土体的略大。

### 3.2 砂卵石层

砂卵石层的典型特征是其内摩擦角、变形模量较黏土层均有所增加,砂卵石层较为坚硬,但易受地下水的影响或是受扰动后其黏聚力很低。冲锤在砂卵石层中掘进时,首先要保证井孔壁的稳定;为了有效地破碎坚硬的卵石,考虑适当增加冲锤质量。砂卵石层的物理力学参数<sup>[12-15]</sup>见表3。

表3 砂卵石层物理力学参数

内摩擦角 / $^{\circ}$	黏聚力 /kPa	泊松比	变形模量 $E_0$ /MPa
36	0	0.20	50

拟合出的砂卵石层中不同孔径井孔底合理的塑性区边界见图4。砂卵石层中冲锤选型的配置参数

见表 4。

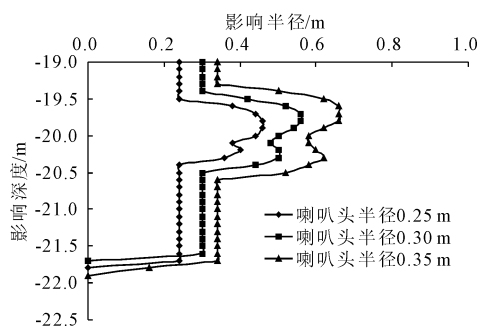


图 4 直径为 0.8 m、1.0 m、1.2 m 的井孔底砂卵石层塑性区范围

拟合出的合理塑性区范围:桩孔半径为 0.4 m 时,塑性区宽度为 0.46 m,深度为 1.8 m;桩孔半径为 0.5 m 时,塑性区宽度为 0.56 m,深度为 1.7 m;桩孔半径为 0.6 m 时,塑性区宽度为 0.66 m,深度为 1.9 m。

表 4 不同孔径的砂卵石层中冲锤参数

桩孔直径/m	冲锤冲程/m	冲锤冲击加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	井孔深/m	冲锤质量/t	环形荷载/kPa	喇叭头外径/m
0.8	1.1	7	20	3.5	10354.81	0.5
1.0	1.1	7	20	4.1	9661.84	0.6
1.2	1.1	7	20	4.8	9267.72	0.7

砂卵石层井孔底的黏聚力很低,岩土体受拉应力作用影响的塑性区更为显著。喇叭头冲击刃平面上方的塑性区边界相比下方的较宽、较高,喇叭头范围上方的塑性区呈开放性区域,下方的塑性区深度较黏土层要大很多。井孔底岩土体塑性区呈“竹节肿胀状”,“竹节”半径同冲击刃半径;冲击刃半径的增加对“肿胀”范围的扩大影响显著,对“竹节”深度变化影响不明显。

为保证孔壁的的稳定,冲锤在砂卵石层掘进时喇叭头半径相比黏土层时要小;为更有效的破碎欲裂剥落至井孔底的坚硬卵石,需增加冲锤的质量及肋板冲击刃数量;选用结构紧凑的冲锤,以保证其坚固耐用;同时需配置大比重、高质量的泥浆采用正循环法及时地将破碎后地砂砾、碎石排出井孔,避免冲锤重复破碎成石粉再排出。

### 3.3 岩层

岩层通常作为支护桩的嵌固层、桩基础的持力层,其典型特征是抗压强度高、变形模量大。井孔底岩土体对冲锤反作用力大,具有硬碰硬的相互作用,冲锤的掘进速率低。V 级软岩层物理力学参数<sup>[12-15]</sup>见表 5。

表 5 V 级软岩层物理力学参数

内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比	变形模量 E <sub>0</sub> /MPa
51	950	0.15	1150

拟合出的岩层中不同孔径井孔底合理的塑性区边界见图 5。岩层中冲锤选型的配置参数见表 6。

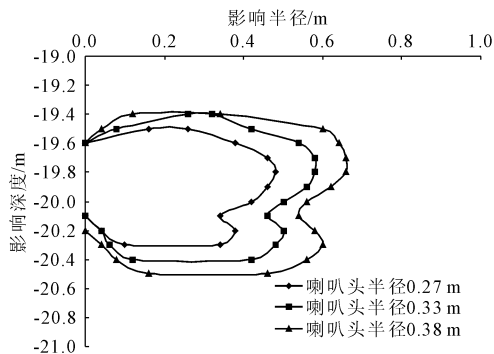


图 5 直径为 0.8 m、1.0 m、1.2 m 的井孔底 V 级岩层塑性区范围

拟合出的合理塑性区范围:桩孔半径为 0.4 m 时,塑性区宽度为 0.48 m,深度为 0.3 m;桩孔半径为 0.5 m 时,塑性区宽度为 0.58 m,深度为 0.4 m;桩孔半径为 0.6 m 时,塑性区宽度为 0.66 m,深度为 0.5 m。

表 6 不同孔径的 V 级岩层中冲锤参数

桩孔直径/m	冲锤冲程/m	冲锤冲击加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	井孔深/m	冲锤质量/t	环形荷载/kPa	喇叭头外径/m
0.8	1.1	7	20	4.0	37301.5	0.54
1.0	1.1	7	20	4.7	34359.3	0.66
1.2	1.1	7	20	5.7	33731.5	0.76

V 级软岩层井孔底的塑性区边界近似地呈喇叭头冲击刃平面上下几乎对称、沿桩轴线对称分布的封闭空间。冲击刃半径的增加,对扩大塑性区宽度影响显著,对塑性区高度增加略有影响。岩层黏聚力大,削弱了喇叭头冲击刃的环形荷载对井孔底岩层的影响力度,远离荷载的井孔底核心处岩体的塑性区深度变浅。

为提高岩层井孔中冲锤的掘进速率,在喇叭头外径满足井孔上覆其他地层安全掘进的前提下,尽可能地增加冲锤质量,增加冲锤对岩层的冲击作用;冲击刃选用高强度耐磨钢、并锯齿状高强焊接,对井孔底岩层形成大的欲裂冲击力,同时对岩块进行小范围的侵入式挤压破碎;控制冲击式钻机的悬距,确

保冲锤高能的冲击岩层;采用正循环法及时地将井孔底的碎石排出井孔。

## 4 结 论

本文基于 Mindlin 课题基本解通过积分建立环形荷载作用下孔底岩土体力学模型;根据莫尔-库仑准则及数学软件分析、计算得出孔底范围岩土体的塑性区边界。根据孔底不同岩土体理想的塑性区边界分析得出合理的冲锤质量及喇叭头外径。

(1) 喇叭头冲击刃直径的增加可有效的扩大井孔底岩土体的塑性区宽度,井孔底的塑性区深度略有增加。

(2) 合理的喇叭头半径配置质量较小的冲锤可对以黏土层为主的孔底土体形成较理想的塑性区范围。

(3) 掘进砂卵石层的合理喇叭头半径较掘进黏土层的小;增加冲锤配重利于破碎孔底的岩块(卵石),而对孔周的塑性区宽度影响较小。

(4) 在掘进岩层时须配置质量大的冲锤,喇叭头须焊接高强度耐磨钢作为冲击刃承受巨大荷载;孔底轴线处塑性区深度较外围浅,在喇叭头内腔增设一字型横梁冲击刃加强轴线处岩体破碎。

(5) 进一步计算分析可得:当井孔深较浅时,冲锤的冲击力作用使井孔口附近的岩土体均处于塑性区范围,从孔底冲锤的冲击掘进受力角度阐明孔口埋设护筒的必要性。随着井孔深度的增加,相同的环形荷载对井孔底岩土体形成的塑性区范围逐渐变小,冲锤的掘进速率变低,变厚的上覆盖层增加了对井孔底岩土体约束的缘故。

(6) 在终孔环节通过减小冲锤行程、增加浆液密度、调整冲锤悬距等措施减小冲锤冲击力,减小对桩孔底岩土体的扰动范围,减少桩底虚土。

## 参考文献:

- [1] 程万里. 冲锤对冲击钻机掘进效率的影响及成孔质量研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [2] 马 露,卢廷浩,陈 帅. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的灌注桩桩底沉渣影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(6): 236-241.
- [3] 王宁伟,王心哲,韩 旭,等. 大连太平湾工程大直径灌注桩后压浆技术的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2):127-130.
- [4] 吴 鹏,龚维明,梁书亭,等. 钻孔灌注桩桩端破坏模式及极限承载力研究[J]. 公路交通科技,2008,25(3):27-31.
- [5] 程万里,黄明奎,牛新立. 组合式冲击钻机工作性能及成桩质量研究[J]. 建筑技术,2012,43(8):746-748.
- [6] 姚爱国. 岩土工程钻进原理[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2000:38.
- [7] Labiouse V, Descoedres F, Montani S. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks [J]. Struct Eng Int, 1996,3(1):171-175.
- [8] Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics,1936,7(5):195-202.
- [9] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质,2010,37(2):59-64.
- [10] 王林峰,唐红梅,唐 芬,等. 基于正交设计的不同垫层落石冲击力试验研究[J]. 中国铁道科学,2017,38(5):16-21.
- [11] 胡鹏飞,张在明. 利用数学软件对 Mindlin 解的积分及工程应用[J]. 岩土工程技术,2008,22(1):1-5.
- [12] 公路隧道设计规范 JTG D70—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004:74.
- [13] 铁路隧道设计规范 TB 10003—2016 [S]. 北京:中国铁道出版社,2017:130.
- [14] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京:中国建筑工业出版社,2018:76-86.
- [15] 江小兵,张浩博. 有限元计算中土的变形模量取值探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):236-241.